

---

# Teknillinen korkeakoulu

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Klaus Jaukkari

Taajuusmuuttajan tulokuristimen suurtaajuusominaisuudet

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa, 3.12.2004.

Työn valvoja

Professori Jorma Kyyrä

Työn ohjaaja

Dipl.ins. Jari Yli-Juuti

# TEKNILLINEN KORKEAKOULU

# DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Klaus Jaukkari	
Työn nimi:	Taajuusmuuttajan tulokuristimen suurtaajuusominaisuudet	
Päivämäärä:	3.12.2004	Sivumäärä: 66
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto	
Professori:	S-81 Tehoelektroniikka ja sähkökäytöt	
Työn valvoja:	Jorma Kyyrä, Teknillinen korkeakoulu	
Työn ohjaaja:	Dipl.ins. Jari Yli-Juuti, ABB OY	

Työssä on tutkittu tulokuristimia, joilla voidaan vaikuttaa taajuusmuuttajan johtuviin häiriöihin. Työssä käsitellään kolmivaiheisen jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan yhteydessä olevaa tulokuristinta. Kuristimen käyttöympäristöstä johtuen käsittely rajataan kolmivaiheisiin vaihtovirtakuristimiin. Työssä tutkitaan, miten kuristimella voidaan vaikuttaa taajuusmuuttajan suurtaajuisiin johtuviin häiriöihin erityisesti taajuuksilla 150 kHz – 2 MHz, koska taajuusmuuttajien yhteydessä tämä taajuusalue on ongelmallinen johtuvien häiriöiden suhteen.

Työssä vertailtiin erilaisia kuristimia mittaamalla pelkkää kuristinta ja tämän lisäksi tarkasteltiin suurtaajuusominaisuuksia kuristinten ja taajuusmuuttajan avulla. Suurilla taajuuksilla induktanssin lisäksi kuristimen sähköisistä suureista erityisesti hajakapasitanssi vaikuttaa kuristimen suurtaajuusominaisuuksiin.

Laitteesta erillään mitattuna kuristimista selvästi paras väliin kytkemiskerroin saavutettiin foliokuristimella, johon oli lisätty erillinen maadoitettu foliokerros johdinkierrosten väliin. Käytännön toimintaa vastaavassa tilanteessa vertailtiin kahta kuristinta taajuusmuuttajaan kytkettyinä. Tässäkin tapauksessa parhaiten laitteen johtuvien häiriöiden tasoa alensi lisämaadoituksella varustettu foliokuristin. Verrattaessa johtuvien häiriöiden standardien raja-arvoihin suurimmat häiriöt mitatussa taajuusmuuttajassa olivat taajuuksilla 150 kHz – 1 MHz. Näillä taajuuksilla lisämaadoituksella varustettu kuristin pärjasi parhaiten tavalliseen foliokuristimeen verrattuna. Sen avulla saavutetaan siis käytännön hyötyä, kun vaatimuksena on standardien johtuvien häiriöiden vaatimuksien täyttö.

Avainsanat:	Taajuusmuuttaja, kuristin, suurtaajuushäiriöt, johtuvat häiriöt, sähkömagneettinen yhteensopivuus.
-------------	--

HELSINKI UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY

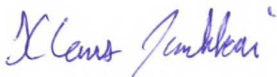
ABSTRACT OF THE  
MASTER'S THESIS

Author:	Klaus Jaukkari	
Name of the thesis:	High Frequency Characteristics of the Input Choke of Frequency Converter	
Date:	3.12.2004	Number of pages: 66
Department:	Electrical and Communications Engineering	
Professorship:	S-81 Power Electronics and Electric Drives	
Supervisor:	Professor Jorma Kyyrä, Helsinki University of Technology	
Instructor:	M.Sc. Jari Yli-Juuti, ABB OY	
<p>The aim of this thesis is to find out, which kind of inductor can be used to reduce conducted emissions from a frequency converter. The main concern is to examine alternating current inductors, which can be used in three phase frequency converters. Frequencies 150 kHz - 2 MHz are troublesome in the frequency converters and therefore we concentrate especially on these frequencies.</p> <p>In this thesis the comparison is made between different inductors by measuring inductors in a frequency converter as well as without the converter. High frequency properties of an inductor are determined mainly by the inductance and stray capacitance of the inductor.</p> <p>The best insertion loss in the measurements without the frequency converter was achieved with a folio inductor, in which earthed extra layers of folio had been inserted between usual folio conductors of the inductor. Two different kind of inductors were also measured with a frequency converter. In this measurement it was also found out that the inductor with earthed extra layers of folio reduced the conducted emissions of the frequency converter most. When comparing conducted emissions to the limits in the standards, the highest emissions occurred at frequencies 150 kHz -1 MHz. Especially at these frequencies the inductor with the extra folio layer was better than normal inductor with folio used as an conductor. Therefore, the inductor with extra folio layers helps to meet the requirements in the standards concerning conducted emissions.</p>		
Keywords:	Frequency converter, high frequency interference, inductor, conducted emissions, electromagnetic compatibility.	

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy:n Drives divisioonassa Helsingissä 2004. Haluan kiittää työn valvojaa professori Jorma Kyyrää ja ohjaajaa Jari Yli-Juutia saamistani ohjeista ja neuvoista diplomityötä koskien.

Espoossa, 3. joulukuuta 2004



Klaus Jaukkari



## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>TAAJUUSMUUTTAJA JA SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS.....</b>	<b>9</b>
2.1	TAAJUUSMUUTTAJAN TOIMINTA .....	9
2.2	SÄHKÖMAGNEETTISET HÄIRIÖT .....	11
2.2.1	EMC:n määritelmä .....	11
2.2.2	Johtuvat häiriöt.....	11
2.2.3	Mittaustapa .....	13
2.2.4	Standardin raja-arvot .....	14
2.3	HARMONISET HÄIRIÖT .....	15
<b>3</b>	<b>KURISTIMEN OMINAISUUDET.....</b>	<b>17</b>
3.1	INDUKTANSSI .....	17
3.2	SIJAIKSYTKENTÄ.....	19
3.3	SUURTAAJUUSOMINAIUUDET .....	19
3.4	VÄLIINKYTKEMISKERROIN.....	21
3.5	TARPEELLISET OMINAISUUDET .....	22
3.6	HAJAKAPASITANSSI .....	24
3.7	TARKASTELTAVAT KURISTIMET.....	25
<b>4</b>	<b>MITTAUKSET.....</b>	<b>29</b>
4.1	MITTALAITTEET.....	29
4.2	INDUKTANSSIN MITTAUS JÄNNITEPULSSILLA .....	29
4.3	TAAJUUS- JA VAIHEVASTEEN MITTAUSKYTKENTÄ .....	31
4.4	MITTAUSTULOKSET .....	32
4.4.1	Induktanssimittaukset.....	32
4.4.2	Impedanssimittaukset.....	35
4.4.3	Väliinkytkemiskertoimen mittaukset.....	38
4.4.4	Vaihevaste.....	41
4.4.5	Mittauskytkennän häiriöt .....	43
4.4.6	Johtuvat häiriöt.....	45
<b>5</b>	<b>LOPPUPÄÄTELMÄT.....</b>	<b>51</b>
	<b>LÄHDELUETTELO .....</b>	<b>53</b>
	<b>LIITE A INDUKTANSSIMITTAUKSEN TULOKSET.....</b>	<b>55</b>
	<b>LIITE B IMPEDANSSIMITTAUKSEN TULOKSET .....</b>	<b>57</b>
	<b>LIITE C VÄLIINKYTKEMISKERROINMITTAUKSEN TULOKSET .....</b>	<b>59</b>
	<b>LIITE D JOHTUVIEN HÄIRIÖIDEN MITTAUSTULOKSET .....</b>	<b>61</b>

## Käytetyt merkinnät

$A$	poikkipinta-ala
$B$	magneettivuon tiheys
$C_L$	kuristimen hajakapasitanssi
dB	desibeli
$di/dt$	sähkövirran muutosnopeus ajan suhteen
$du/dt$	jännitteen muutosnopeus ajan suhteen
$f$	taajuus
$f_0$	ominaistaajuus
$H$	magneettikentän voimakkuus
$I$	virta
$i_{sh}$	virran h:s harmoninen komponentti
$j$	imaginaariyksikkö
$L$	induktanssi
$l$	pituus
$\log_{10}$	10-kantainen logaritmi
$N$	käämin kierrosluku
$Q$	kuristimen hyvyysluku
$R_C$	kondensaattorin resistiivinen vastus
$R_L$	kuristimen resistiivinen vastus
$R_m$	mittalaitteen sisäinen resistanssi
$T_1$	perustaajuisen 50Hz vaihtosähkön jaksonaika
$u_j$	jännite komponentin yli
$U$	jännite
$Z_L$	kuristimen impedanssi
$\Phi$	magneettivuo
$\mu$	permeabiliteetti
$\omega$	kulmataajuus
$\omega_0$	ominaisresonanssikulmataajuus

## KÄYTETYT LYHENTEET

ABB	Asea Brown Boveri
ACS600	ABB:n taajuusmuuttajatyypin (tehoalueelle 2,2-315kW)
ACS800	ABB:n taajuusmuuttajatyypin
IL	Insertion loss, väliinkytkemiskerroin
LISN	Line impedance stabilisation network, keinoverkko
LCR	Induktanssi, kapasitanssi ja resistanssi (-mittari)
THD	Total Harmonic Distortion, harmoninen kokonaissärö

# 1 JOHDANTO

Tekniikan kehittyessä markkinoille ja käyttöön on tullut yhä nopeampia tehopuolijohdekomponentteja. Samalla tämä tarkoittaa, että sähkölaiteissa käytetään suurempia virran ( $di/dt$ ) ja jännitteen ( $du/dt$ ) muutosnopeuksia. Nämä aiheuttavat enemmän häiriöitä sähköverkkoon sekä lisäksi lähiympäristöönsä säteilevinä häiriöinä. Häiriöt kytkeytyvät sähköverkkoon sekä syöttöjohtimia pitkin että säteilemällä. Säteilemällä kytkeytyminen muuttuu tärkeimmäksi kytkeytymistavaksi kymmenien megahertsien taajuuksilla ja johtuvat häiriöt ovat merkittävimpiä tätä matalammilla taajuuksilla. Virran muutosnopeutta voidaan rajoittaa tehokkaasti muunmuassa lisäämällä piiriin induktanssia. Kuristin toimii tällaisena komponenttina eli rajoittaa virran muutosnopeutta esimerkiksi nopeiden puolijohdekomponenttien kytkentähetkellä.

Tässä työssä käsitellään kolmivaiheisen jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan yhteydessä olevaa tulokuristinta. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan syöttöpuolella olevasta diodi- tai tyristorisillasta, jolla sähköverkon vaihtojännite tasasuunnataan, käytetään tässä diplomityössä nimitystä tulosilta. Taajuusmuuttajan tulosillan kautta ottama virta ei ole sinimuotoista ja sisältää näinollen virran yliaaltoja. Tämän vuoksi tulosillan yhteydessä käytetään usein kuristimia. Ne voivat olla joko ennen tasasuuntausta eli syöttöverkon puolella, jolloin kuristin toimii vaihtojännitteessä, tai tulosillan toisella puolella, jolloin kuristin on kytkettynä tasajännitevälipiiriin. Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia, millaisella kuristimella voidaan vaikuttaa mahdollisimman hyvin taajuusmuuttajan johtuviin häiriöihin.

Yleensä hankalimmat johtuvat häiriöt aiheutuvat taajuusmuuttajan ja ohjattavan moottorin yhteydessä käytettävän moottorikaapelin aiheuttamista resonansseista sekä puolijohdekomponenttien kytkemisistä. Näiden resonanssien vuoksi suurin huomio tässä diplomityössä keskitetään taajuuksiin 150 kHz – 2 MHz. [Yli-Juuti, 2003] Tavoitteena on tutkia, miten kolmivaiheisella vaihtovirtakuristimella voidaan vaikuttaa taajuusmuuttajan suurtaajuisiin johtuviin häiriöihin erityisesti mainitulla taajuusalueella.

Kappaleessa kaksi käydään läpi taajuusmuuttajan sekä sähkömagneettisten häiriöiden perusteoriaa. Lisäksi kappaleessa esitellään kyseisiä laitteita koskevia standardeja ja raja-arvoja. Kappale kolme keskittyy kuristimen ominaisuuksiin. Kyseisessä kappaleessa käsitellään kuristimen sähköisiä ominaisuuksia eri taajuuksilla sekä esitellään työssä mitattavat kuristimet. Kappaleessa neljä käydään läpi käytettävät mittalaitteet, mittaustavat sekä -tulokset. Erilaisia mitattavia asioita ovat induktanssi, impedanssi, väliin kytkemiskerroin, vaihevaste sekä taajuusmuuttajan johtuvat häiriöt.

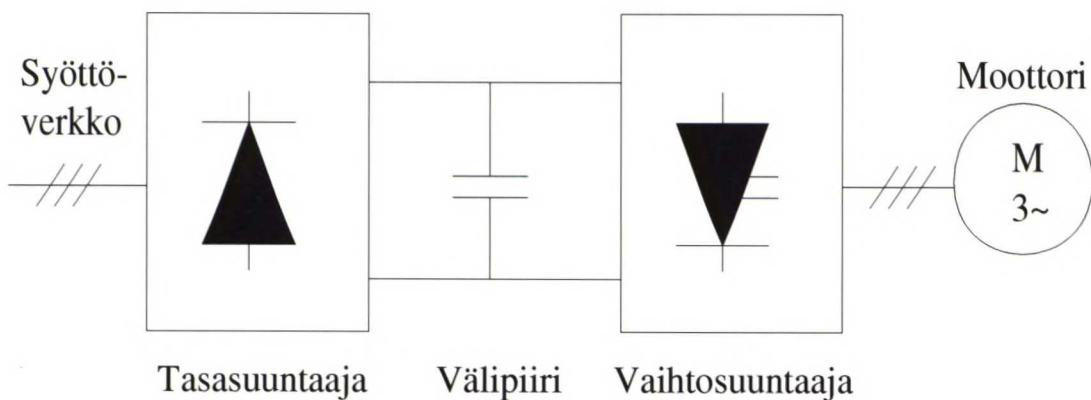


## 2 TAAJUUSMUUTTAJA JA SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS

### 2.1 Taajuusmuuttajan toiminta

Kuristimen ensisijainen tehtävä taajuusmuuttajassa on suodattaa verkkotaajuuden monikertoja eli niinsanottuja harmonisia yliaaltoja. Kuusipulssisen diodisillan tapauksessa suurimmat harmoniset yliaallot ovat viides ja seitsemäs. [Mohan et al. 1995] Työssä keskitytään käsittelemään kolmivaiheisia vaihtovirtakuristimia, joita käytetään esimerkiksi ABB:n ACS600 ja ACS800 taajuusmuuttajasarjoissa suurissa teholuokissa. Syöttöpuolelle ennen tasasuuntausta sijoitettu kuristin suojaa samalla tulosiltaa sähköverkossa esiintyviltä jännitepiikeiltä.

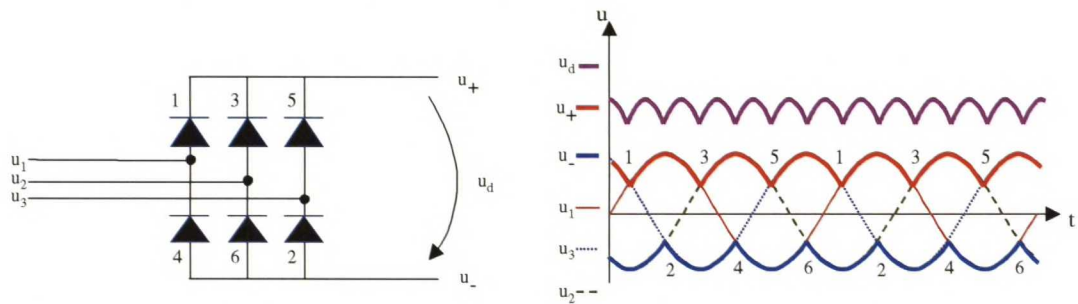
Kuvassa 2.1 on esitetty tasajännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaatteellinen kytkentä. Diplomityössä käsitellään taajuusmuuttajaa, joka on kytketty kolmivaiheiseen syöttöverkkoon ja jolla ohjataan yleensä kolmivaihemootoria.



Kuva 2.1. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaatekytkentä.

Tasasuuntaaja muuttaa vaihtosähkön tasasähköksi, joka välipiirillisessä taajuusmuuttajassa varataan tasajännitevälipiirin kondensaattoreihin. Yleisin tasasuuntaaja on kuusipulssisuuntaaja. [Niiranen, 1997] Kuusipulssinen diodisilta toimii automaattisesti eli on verkkokommutoiva. Virta siirtyy diodilta toiselle kolmivaiheisen syöttöjännitteen pakottamana kuvan 2.2 mukaisesti. Kuvassa diodit on numeroitu ja jännitekäyrien kohdalle on merkitty kohta missä kukin kuudesta diodista alkaa johtaa. Kuusipulssisen tasasuuntaussillan positiivisen haaran  $u_+$  jännitekäyrä on merkitty punaisella ja negatiivisen haaran  $u_-$  sinisellä. Näiden erotuksena muodostuvan tasajännitteen  $u_d$  käyrämuoto on merkitty violetilla.

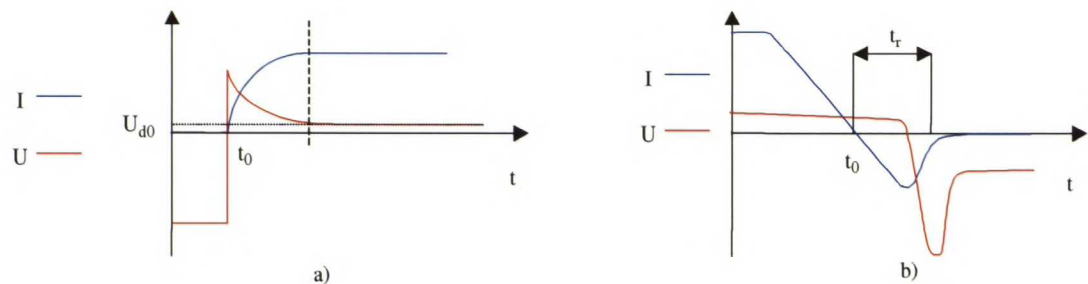




Kuva 2.2. Kuusipulssisen diodisillan toiminta ja jännitteiden käyrämuodot.

Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan välipiirikondensaattorit ovat kapasitanssiltaan suuria ja tasaavat jännitteen  $u_d$  käytännössä vielä tasaisemmaksi kuin mitä kuusipulssinen tasasuuntaussilta tuottaa kuvan 2.2 mukaan. Välipiirikondensaattoreita käytetään tasajännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa jännitteen tasoittamisen lisäksi energian varastointiin.

Tasasuuntaussillan diodit ovat yksi taajuusmuuttajan suurtaajuisten häiriöiden lähteistä. Diodilla on päästösuuntainen kynnyisjännite  $U_{d0}$ , joka on suuruudeltaan diodista riippuen yleensä 0,2 – 0,8 voltia. Kuvissa 2.3 a) ja b) on esitetty diodin virran ja jännitteen muutos ajan suhteen kytkentähetkellä. Diodin yli olevan jännitteen laskiessa alle päästöjännitteen, diodin virta pienenee ja jännite vaihtuu negatiiviseksi hetkellä  $t_0$ . Tämän jälkeenkin diodi johtaa vielä hetken ( $t_r$ ). Tämä johtuu siitä, että diodissa on vielä varauksenkuljettajia eikä sammumiseen tarvittava niinsanottu tyhjennysalue ole ehtinyt muodostua. Tällöin diodin sammumassa esiintyy takavirtapiikki, jolloin diodi johtaa estosuuntaan. [Niiranen, 1997]



Kuva 2.3. Diodin jännitteen ja virran käyrämuodot ajan funktiona diodin a) syttyessä ja b) sammumassa.

Diodit voidaan jakaa nopeisiin ja hitaisiin diodeihin takavirran kestoajan  $t_r$  perusteella. Nopeissa diodeissa  $t_r$  on pienempi kuin kymmenen mikrosekuntia. Nopeiden diodien virta- ja estojännitekestoisuus eivät ole yhtä suuret kuin hitailla niinsanotuilla verkkotaajuisilla diodeilla. Lisäksi virran nopeat muutokset diodin sammumishetkellä aiheuttavat yhdessä hajainduktanssien kanssa suuria jännitteitä ja samalla suurtaajuisia häiriöitä. Tarvittaessa sovelluksissa voidaan käyttää myös niinsanottuja pehmeästi toipuvia diodeja jolloin takavirta ei katkea yhtä nopeasti kuin tavallisessa diodissa. Pehmeästi toipuvien diodien huonona puolena on kuitenkin se,

että tällöin komponentin jännitehäviö johtavassa tilassa tulee diodin rakenteesta (puolijohteen seostuksesta) johtuen suuremmaksi kuin tavallisella diodilla. [Niiranen, 1997]

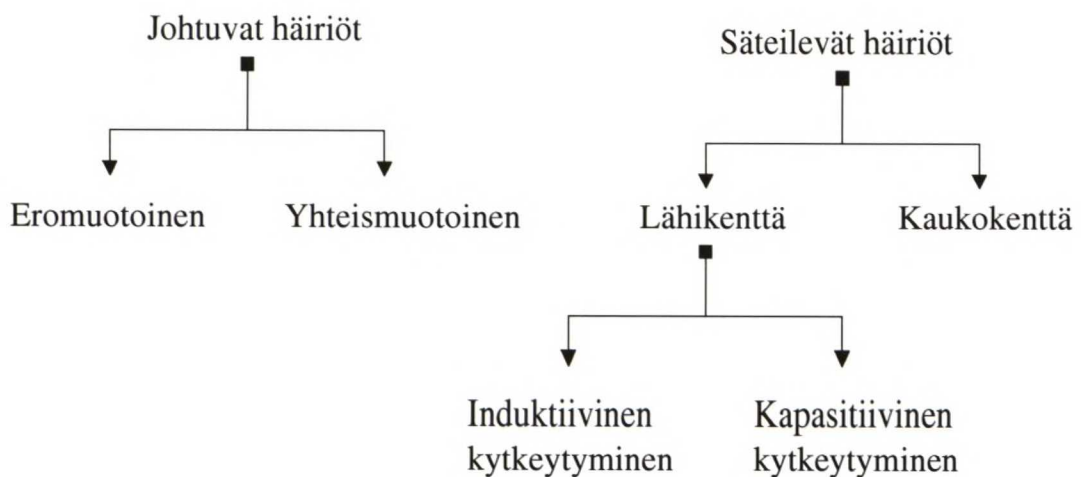
## 2.2 Sähkömagneettiset häiriöt

### 2.2.1 EMC:n määritelmä

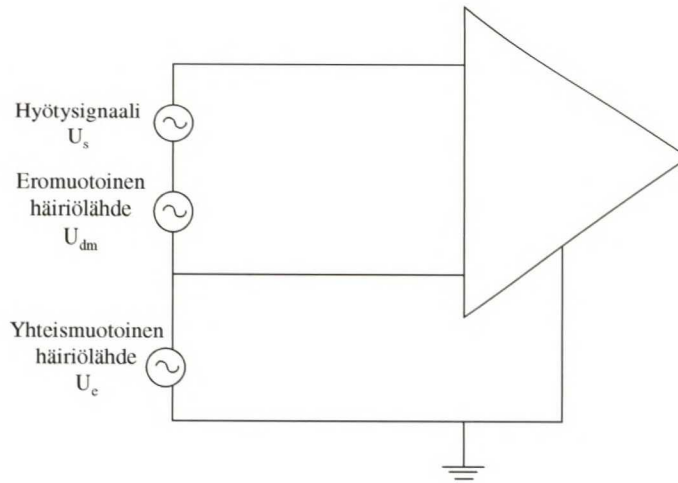
Euroopassa on sähkölaitteiden häiriöherkkyyttä ja häiriöiden tuottamista rajoittavia yleiseurooppalaisia IEC:n standardeja, jotka ovat käytössä useissa maissa. Euroopan maissa on omia kansallisia standardeja, jotka usein kuitenkin perustuvat IEC:n vastaavaan standardiin. EMC eli sähkömagneettinen yhteensopivuus tarkoittaa laitteen kykyä toimia sähkömagneettisia häiriöitä sisältävässä ympäristössä. Lisäksi laite itsessään ei saa tuottaa liikaa häiriöitä. Paitsi sähkölaitteet myös luonnonilmiöt kuten salamointi ja kosminen säteily aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä. EMC-standardin mukaan laite ei saa häiriintyä liian helposti eikä tuottaa kohtuuttomasti itse häiriöitä. Erilaisille ja eri toimintaympäristöissä toimiville laitteille on määriteltä omat raja-arvot häiriötasoille.

### 2.2.2 Johtuvat häiriöt

Kuvassa 2.4 on esitetty sähkömagneettisten häiriöiden jaottelu lähteen [Sepponen, 2001] mukaisesti. Häiriöt voidaan jakaa johtuviin ja säteileviin häiriöihin etenemistien perusteella. Tässä diplomityössä keskitytään erityisesti johtuviin häiriöihin, jotka voidaan jaotella yhteis- ja eromuotoisiin häiriöihin. Yksi käytännön laitteiden EMC-suunnittelun tärkeimmistä asioista on yhteis- ja eromuotoisten häiriöiden tunnistaminen, koska niiden vähentämiseen tarvittavat ratkaisut eroavat toisistaan. Kuvasta 2.5 käy ilmi yhteis- ja eromuotoisen häiriön periaatteellinen kytkeytyminen piiriin.



Kuva 2.4. Häiriömuotojen jaottelu.



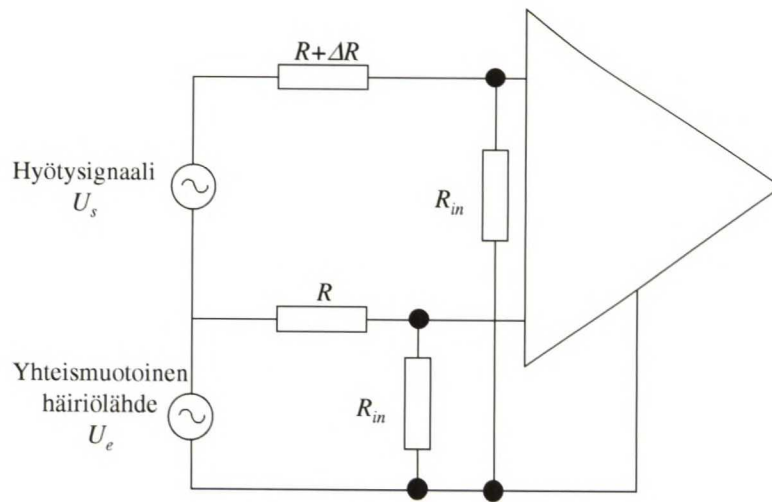
Kuva 2.5. Yhteis- ja eromuotoinen häiriö piirissä

Eromuotoinen häiriö kytkeytyy piiriin vastaavasti kuin itse hyötysignaali. Yhteismuotoisella häiriöllä sen sijaan on ainakin yksi kytkeytymistie, joka ei ole signaalin kulkutie. Kuvassa 2.5 tämä kulkutie on merkitty maapotentiaaliksi, mutta se voi olla jokin muukin kulkutie riippuen kyseessäolevasta laitteesta. Kolmivaiheiseen syöttöverkkoon liitetyssä taajuusmuuttajassa tämä tarkoittaa käytännössä, että yhteismuotoinen häiriö kulkee laitteen ulkopuolella nollajohtimen tai maapotentiaalin kautta. Laitteen sisällä yhteismuotoisen häiriön kulkureittejä voi olla monia riippuen taajuusmuuttajan rakenteesta. Piirit ovat yleensä herkempiä ero- kuin yhteismuotoiselle häiriölle. Yhteismuotoinen häiriö voi kuitenkin muuttua myös eromuotoiseksi, jos esimerkiksi eri signaaliteiden impedanssit eivät ole keskenään samansuuruiset. [Sepponen, 2001]

Kuvan 2.6 mukaisessa tilanteessa aiheutuvan eromuotoisen häiriön  $U_{dm}$  suuruus saadaan yhtälön (2-4) mukaan, jos oletetaan sisääntuloimpedanssin  $R_{in}$  olevan paljon suurempi kuin  $R$  ja  $\Delta R$ . Käytännön tilanteessa yleensä näin on, koska signaalitien impedanssi pyritään pitämään yleensä mahdollisimman pienenä häviöiden vähentämiseksi ja laitteiden sisääntuloimpedanssit ovat sitävastoin yleensä suuria.

$$U_{dm} \approx \frac{\Delta R}{R + R_{in}} U_e \quad (2-4)$$



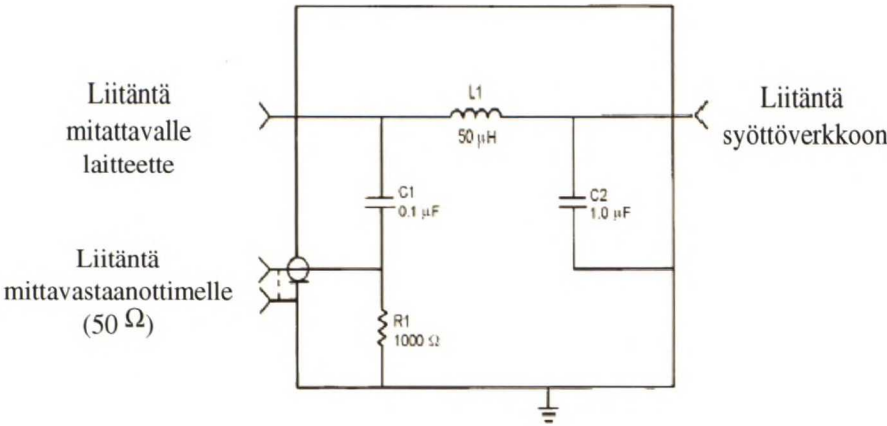


Kuva 2.6. Yhteismuotoisen häiriön muuntuminen eromuotoiseksi impedanssien epätasapainon vuoksi.

### 2.2.3 Mittaustapa

Jotta johtuvien häiriöiden mittauksissa käytettävän laitteen syöttöverkon ominaisuudet voidaan tehdä vakioksi, tarvitaan niinsanottu keinoverkko (engl. LISN, line impedance stabilisation network) mitattavan laitteen ja sähköverkon väliin. Lisäksi keinoverkko erottaa mitattavan laitteen syöttöverkossa esiintyvistä häiriöistä, etteivät ne pääse vaikuttamaan mittaustuloksiin.

Keinoverkon ominaisuudet on määritelty standardissa [CISPR 16, 1999]. Kuvassa 2.8 on esitetty EN 55011 standardin mukainen keinoverkon esimerkkikytkentäkaavio johtuvia häiriöitä mitattaessa. Johtuvat häiriöt mitataan mittavastaaanottimella  $50\ \Omega$  resistanssin yli ja lisäksi keinoverkko sisältää  $50\ \mu\text{H}$  induktanssia. Kolmivaiheista laitetta mitattaessa yksi vaiheista kytketään mittavastaaanottimen  $50\ \text{ohmin}$  mitta-vastuksen kautta maapotentiaaliin. Kaksi muuta vaihetta kytketään samalla symmetrisesti  $50\ \text{ohmin}$  vastusten kautta maapotentiaaliin. Keinoverkossa on lisäksi myös kapasitanssia eli sopivankokoiset kondensaattorit, jotta mittauskytkennän impedanssi pysyy halutun suuruisena mittauksissa käytettävällä  $0,15 - 30\ \text{MHz}$  taajuusalueella.



Kuva 2.8. Keinoverkon esimerkkikytkentäkaavio, jolla saavutetaan standardinmukainen mittausimpedanssin taajuusvaste. [CISPR 16, 1999]

2.2.4 Standardin raja-arvot

EN 61800-3 standardissa on määritelty johtuvien häiriöiden raja-arvot luokiteltuina eri käyttöympäristöihin tarkoitetuille laitteille. Nämä raja-arvot on esitetty taulukoissa 2.1 ja 2.2. Rajoittamaton jakelu tarkoittaa, että laitteiden ostajien ja käyttäjien pätevyyttä EMC asioiden suhteen ei ole määritelty. Rajoitetussa jakelussa sen sijaan pitää laitteen myyjien, ostajien tai käyttäjien yhdessä tai erikseen tuntea kyseisen sähkömoottorikäyttösovelluksen EMC-vaatimukset, jotta laite toimii oikein. Ensimmäinen käyttöympäristö sisältää kotitalouskäyttöön tarkoitetut laitteet ja laitteet, jotka kytetään suoraan (ilman muuntajaa välissä) samaan matalajänniteverkkoon kuin kotitalouksien sähkönsyöttö. Toinen käyttöympäristö kattaa muut kuin ensimmäisen käyttöympäristön laitteet.

Taulukko 2.1. Ensimmäisen käyttöympäristön johtuvien häiriöiden raja-arvot taajuuksille 0,15 – 30 MHz. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]

Taajuusalue	Rajoittamaton jakelu		Rajoitettu jakelu	
	Näennäishuippuarvo	Huippuarvo	Näennäishuippuarvo	Huippuarvo
0,15 - 0,50 MHz	66 - 56 (Raja-arvo laskee taajuuden funktiona logaritmisesti.)	56 - 46 (Raja-arvo laskee taajuuden funktiona logaritmisesti.)	79	66
0,5 - 5,0 MHz	56	46	73	60
5,0 - 30,0 MHz	60	50	73	60



Taulukko 2.2. Toisen käyttöympäristön johtuvien häiriöiden raja-arvot taajuuksille 0,15 – 30 MHz. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]

Laitteen nimellisvirta	Taajuusalue	Näennäishuippuarvo	Huippuarvo
$\leq 100 \text{ A}$	0,15 - 0,50 MHz	100	90
	0,5 - 5,0 MHz	86	76
	5,0 - 30,0 MHz	90 - 70	80 - 60
		(Raja-arvo laskee taajuuden funtiona logaritmisesti.)	(Raja-arvo laskee taajuuden funtiona logaritmisesti.)
$> 100 \text{ A}$	0,15 - 0,50 MHz	130	120
	0,5 - 5,0 MHz	125	115
	5,0 - 30,0 MHz	115	105

### 2.3 Harmoniset häiriöt

Johtuvista EMC-häiriöistä puhuttaessa ei tarkoiteta varsinaisen verkkotaajuuden harmonisia komponentteja, jotka ovat verkkojännitteen (50 Hz) kerrannaistaajuuksia. Harmonisista taajuuksista voi kuitenkin aiheutua myös suurtaajuisempia häiriöitä, jotka kuuluvat johtuvien EMC-häiriöiden taajuusalueelle. Häiriötaajuudet muodostuvat lisäksi esimerkiksi käytetyistä kellotaajuuksista ja erilaisista sähköisistä resonansseista. Resonanssitaajuuksiin vaikuttavat sekä varsinaiset laitteeseen kuuluvat komponentit (puolijohteet, vastukset, kondensaattorit, käämit jne.) että erilaisista syistä piiriin aiheutuvat hajakapasitanssit ja -induktanssit. Lisäksi säteileviin häiriöihin vaikuttavat oleellisesti häiriöitä aiheuttavien kaapelien ynnä muiden johdinten sähköiset pituudet.

Harmoniset komponentit muodostavat merkittävän häiriölähteen EMC-häiriöistä puhuttaessa. Vaikka harmonisten komponenttien amplitudi on pienempi kuin perustaajuisen jännitteen, niiden suurempi taajuus aiheuttaa sitä suuremman häiriön mitä suurempi taajuus on kyseessä. Laitteen ottama virta ajan funktiona on  $i_s(t)$ . Virran tehollisarvo  $I_s$  muodostuu verkkotaajuisesta perusaallosta  $i_{s1}(t)$  sekä eritaajuuksisista komponenteista, joista seuraavassa otetaan huomioon perusaallon monikerrat eli niinsanotut harmoniset käyttämällä niistä merkintää  $i_{sh}(t)$ , jossa  $h$  määrittää virran harmonisen.

$$i_s(t) = i_{s1}(t) + \sum_{h \neq 1} i_{sh}(t) \quad (2-1)$$

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_s^2(t) dt} \quad (2-2)$$

$$THD(\%) = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left( \frac{I_{sh}}{I_{s1}} \right)^2} * 100 \quad (2-3)$$

Kuristimen avulla diodisillan syöttöverkkoon aiheuttamaa virran säröprosenttia saadaan pienennettyä. THD (Total Harmonic Distortion) eli harmoninen kokonais-särö riippuu muunmuassa kuristimen induktanssista sekä käytettävän diodi- tai

tyristorisillan ominaisuuksista. THD:tä laskettaessa otetaan huomioon vain virran harmoniset komponentit. Kokonaisvirta sisältää lisäksi myös muuntaajuisia häiriökomponentteja, mutta ne ovat selvästi pienempiä kuin harmoniset, kun kyseessä on taajuusmuuttaja, jossa on syöttöpuolella tasasuuntaussilta.

Taajuusmuuttajan ottamaan virtaan aiheutuu harmonisia häiriöitä, vaikka tasasuuntaussillan kuormitus olisi symmetristä eli kaikkien vaiheiden osalta samanlaista. Tämä johtuu tasasuuntaussillasta. Puolijohdekomponenteilla on kynnysjännite, joka vääristää tasasuuntaussillan ottamaa virtaa. Muita epälinearisuuksia taajuusmuuttajassa ovat esimerkiksi kyllästyvät kuristin- tai muuntajasydämet. Lisäksi diodien tai tyristorien kytkentä eli kommutointi aiheuttaa suurtaajuisia häiriöitä, koska kytkentähetkellä esiintyy suuria jännitteen ja virran muutoksia.

Taajuusmuuttajan verkkovirran sallittu yliaaltosisältö on määritelty standardissa [EN 61000-3-11, 2000]. Yliaaltosisältö saa tämän mukaan olla enintään 46%. Mikäli laitteen säröprosentti on suurempi kuin 46, tarvitaan esimerkiksi kuristin, joka pienentää harmonisia häiriöitä. Kyseisessä standardissa määritelty THD % on tarkoitettu alle 75 ampeerin laitteille. Standardin mukaan yli 75 A laitteissa valmistajan ja laitteen ostajan on tutkittava ja sovittava keskenään mikä on sopiva sallittava THD. Ohjeellista 46 % rajaa voidaan käyttää suunnittelussa kuitenkin myös suurempivirtaisille laitteille. Standardin mukaan harmoniset taajuudet on huomioitava vähintään 25. harmoniseen asti.

Työssä käsiteltävän taajuusmuuttajan tulokuristin on kolmevaiheinen vaihtovirtakuristin, jossa on yhteinen sydän. Kuusipulssisen diodisillan aiheuttama kuormitus on asymmetrinen eli kuristimen kolmesta vaiheesta kuristimen sydämeen aiheutuva vuo ei ole yhteensä nolla. Tämä vaikuttaa kuristimen mitoituksessa suhteessa symmetrisesti kuormitettavaan kolmivaihekuristimeen.

### 3 KURISTIMEN OMINAISUUDET

#### 3.1 Induktanssi

André Marie Ampère (1775 - 1836) tutki sähköä ja magnetismia ja loi yhtälöt näiden välille. Ensimmäisenä sähkön ja magneettikentän välisen yhteyden oli huomannut tanskalainen Hans Christian Ørsted hieman ennen Ampèren lisätutkimuksia ja teorian kehittämistä. Ampère määritteli muunmuassa lävistyslain, jossa on esitetty yhteys magneettikentän voimakkuuden  $H$  ja suljetun polun läpi kulkevien virtojen suhteen. Tämän avulla saadaan yhtälö magneettivuon ja käämin kierrosluvun  $N$  välille kun käämissä kulkeva virta on  $I$ . [Mohan et al. 1995]

$$\oint H ds = NI \quad (3-1)$$

Kun missä tahansa johtimessa kulkee sähkövirtaa, johtimella on myös induktanssia, jonka suuruus riippuu magneettikentästä. Magneettivuo  $\Phi$  määritellään magneettivuon tiheydestä  $B$  seuraavasti, kun se läpäisee poikkipinta-alaltaan  $A$  olevan silmukan. [Mohan et al. 1995]

$$\Phi = \iint_A B dA \quad (3-2)$$

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (3-3)$$

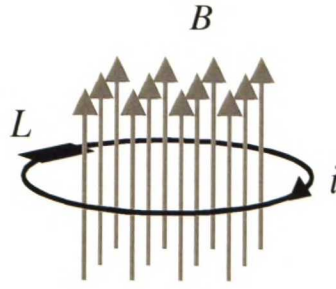
Toisaalta induktanssi voidaan määritellä myös sen yli olevan jännitteen  $u_j$  sekä virran muutosnopeuden  $di/dt$  avulla seuraavasti.

$$L = \frac{u_j}{di/dt} \quad (3-4)$$

Yhtälöstä voidaan ratkaista kelaan tai muuhun johdinsilmukkaan indusoituva sähkömotorinen voima induktanssin ja virran muutosnopeuden funktiona. Aiheutuvan virran suunta saadaan määritettyä keksijänsä mukaan nimetyn Lenzin lain avulla: *”Suljettuun metallilankasilmukkaan indusoituva virta aiheuttaa magneettikentän, joka pyrkii vastustamaan silmukan läpi kulkevan magneettivuon muutosta.”* [Sihvola, 1996] Johdinsilmukkaan indusoituvan jännitteen suuruus riippuu johtimen induktanssista.

$$u_j = \frac{L * di}{dt} \quad (3-5)$$





Kuva 3.1. Johdinsilmukkaan indusoituva virta muuttuvan magneettivuon tiheyden  $B$  vaikutuksesta.

$$i = \frac{\oint_A B dA}{L} \quad (3-6)$$

Yhtälössä (3-6) oletetaan magneettivuontiheyden ja silmukan poikkipinta-alan  $A$  olevan kohtisuorassa toisiaan vasten. Mikäli ne eivät ole kohtisuorassa toisiaan vasten niin laskemisessa on käytettävä esimerkiksi vektorisuureita.

Johdetaan yhteys magneettivuon ja käämin virran  $I$  välille.  $\mu$  on permeabiliteetti, joka riippuu kyseessäolevasta materiaalista ja on vakio tiettyyn pisteeseen asti, kunnes magneettivuon tiheys kasvaa niin suureksi että käämin sydänmateriaali kyllästyy.

$$B = \mu H \quad (3-7)$$

Kun yhdistetään yhtälöt (3-2) ja (3-7)

$$\Phi = \iint_A \mu H dA \quad (3-8)$$

ja kun otetaan huomioon yhtälöt (3-3) ja (3-8)

$$\Phi = \frac{NI\mu A}{l} \quad (3-9)$$

ja siitä edelleen induktanssin  $L$  lausekkeeksi

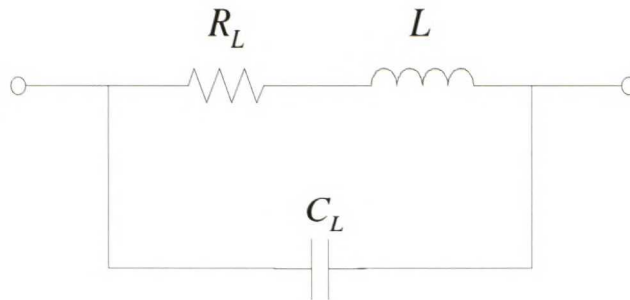
$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (3-10)$$

Yhtälön (3-10) mukaisesti induktanssi kasvaa käämin kierrosluvun  $N$  toisessa potenssissa ja geometriasta johtuvan  $A:l$  -suhteen suuretessa. Todellisuudessa induktanssi ei kuitenkaan ole näiden muuttujien määrittelemänä täysin vakio vaan riippuu esimerkiksi virrasta, taajuudesta sekä lämpötilasta. Suurilla virroilla käämin sydän kyllästyy, kun käytetään rautasydämistä käämiä. Vastaavasti suurilla taajuuksilla

impedanssiin vaikuttavia tekijöitä ovat lisäksi virranajo ja lähivaikutus, jotka molemmat ovat seurausta johtimeen indusoituvista pyörrevirroista. [Niiranen, 1997]

### 3.2 Sijaiskytkentä

Ideaalisen kuristimen sähköisiä ominaisuuksia kuvaa ainoastaan induktanssi  $L$ . Käytännössä epäideaalisuuksien vuoksi todellisessa kuristimessa on lisäksi jonkin verran resistanssia ( $R_L$ ), joka aiheuttaa jännitehäviötä. Kuristimen vastus määrää kuristimen impedanssin tasajännitteellä. Lisäksi varsinkin suurilla taajuuksilla merkitseväksi nousee kuristimen hajakapasitanssi  $C_L$ . Kuvassa 3.2 on kuristimen sijaiskytkentä, kun edellämainitut epäideaalisuudet otetaan huomioon. [Tihanyi, 1995]



Kuva 3.2. Kuristimen sijaiskytkentä

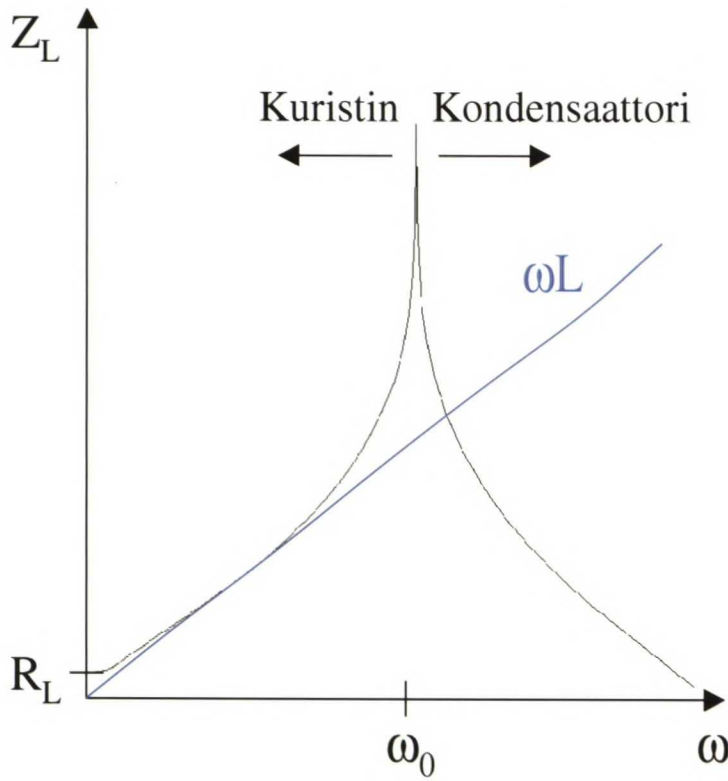
Kuvasta 3.2 saadaan johdettua kuristimen kokonaisimpedanssiksi  $Z_L$  kulmataajuuden  $\omega$  funktiona kun tiedetään parametrit  $L$ ,  $R_L$  ja  $C_L$ . [Tihanyi, 1995]

$$Z_L = \frac{R_L + j\omega L}{1 - \omega^2 LC_L + j\omega RC_L} \quad (3-11)$$

### 3.3 Suurtaajuusominaisuudet

Tasajännitteellä, eli kulmataajuudella nolla, käänin impedanssin määrää vastus  $R_L$ . Pienillä taajuuksilla impedanssin määräävimpänä suureena on induktanssi  $L$  ja suurilla vastaavasti hajakapasitanssi  $C_L$ . Kuvassa 3.3 on kuristimen impedanssi kulmataajuuden  $\omega$  funktiona. [Tihanyi, 1995]





Kuva 3.3. Kuristimen impedanssi esitettynä kulmataajuuden funktiona.

Kuvassa näkyvä kuristimen ominaisresonanssikulmataajuus  $\omega_0$  määräytyy käämin induktanssista ja kapasitanssista seuraavasti.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_L}} \quad (3-12)$$

Taajuuden  $f$  ja kulmataajuuden  $\omega$  välillä on tunnettu yhteys, josta saadaan ratkaistua taajuus hertseinä muunmuassa edellisessä tapauksessa jos halutaan käyttää muuttujana taajuutta kulmataajuuden sijaan. Lisäksi usein kuristimesta ilmoitettu ominaisuus on hyvyysluku  $Q$ .

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3-13)$$

$$Q = \frac{\omega L}{R_L} \quad (3-14)$$

Kuristimen impedanssi  $Z_L$  on suurimmillaan ominaisresonanssitaajuudella. Olettamalla kuristimen impedanssi resonanssitaajuudella paljon suuremmaksi kuin tasavirtaresistanssi  $R_L$  saadaan impedanssiksi resonanssitaajuudella:

$$Z_L(f_0) \approx \frac{L}{R_L C_L} \quad (3-15)$$

Tai vaihtoehtoisesti impedanssi voidaan ilmoittaa kuristimen hyvyysluvun  $Q$  avulla.

$$Z_L(f_0) \approx R_L * Q^2 \quad (3-16)$$

Nämä yhtälöt pätevät siis vain resonanssitaajuudella  $f_0$ . Yhtälöistä nähdään, että kuristimen impedanssi ja samalla vaimennus resonanssitaajuudella on sitä parempi, mitä suurempi hyvyysluku on eli toisinsanoen mitä suurempi induktanssi sillä on suhteessa resistanssiin ja hajakapasitanssiin. Koska impedanssi on suurimmillaan kuristimen ominaistajuudella, kuristin estää tehokkaasti ominaistajuudellaan olevan virran kulkemista kuristimen läpi.

### 3.4 Väliinkytkemiskerroin

Väliinkytkemiskerroin  $IL$  (insertion loss) määritellään tarkasteltavaan komponenttiin tai laitteeseen sisäänmenevän ja ulostulevan tehon avulla. Komponenttia tai laitetta voidaan kuvata yksinkertaistuksen vuoksi neliporttisella mallilla kuvan 3.4 mukaisesti. [Tihanyi, 1995]



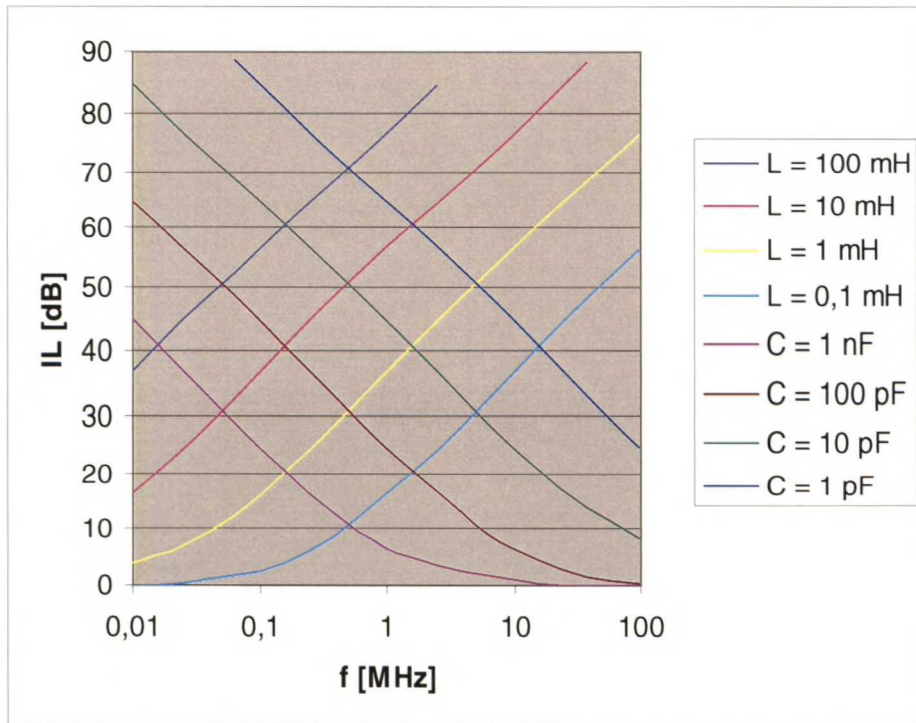
Kuva 3.4. Neliporttimalli

$$IL(dB) = 10 * \log_{10} \left( \frac{U_1 * I_1}{U_2 * I_2} \right) \quad (3-17)$$

Väliinkytkemiskerroin voidaan laskea myös pelkästään jännitteiden avulla.

$$IL(dB) = 20 * \log_{10} \left( \frac{U_1}{U_2} \right) \quad (3-18)$$

Mittauksissa väliinkytkemiskertoimen suuruus riippuu käytettävästä mittalaitteen impedanssista  $R_m$ . Käytännön tilanteessa impedanssi riippuu laitetta syöttävän sähköverkon ominaisuuksista, kun oletetaan että kuristin sijaitsee laitteessa ensimmäisenä syöttöverkosta päin katsottuna. Kuvassa 3.5 esitetään väliinkytkemiskerroin taajuuden funktiona erilaisilla induktanssin ja kapasitanssin arvoilla. Oheisissa käyryissä on käytetty mittavastuksen  $R_m$  arvona 50 ohmia, joka on sama kuin johtuvien häiriöiden mittauksessa käytetyn keinoverkon (engl. Line Impedance Stabilisation Network) mittavastus standardin EN 55011 mukaan. Käytännön tilanteissa syöttöverkon impedanssi voi olla aivan jotain muuta. Asiaa on tarkasteltu enemmän lähdeoteoksessa. [Tihanyi, 1995]



Kuva 3.5. Kuristimen väliinkytkemisvaimennus taajuuden funktiona erilaisilla induktanssin ja kapasitanssin arvoilla. [Tihanyi, 1995]

### 3.5 Tarpeelliset ominaisuudet

Usein suurivirtaisissa ja suuritehoisissa sovelluksissa voidaan käyttää kuristimena niinsanottua foliokäämittyä kuristinta, jolla saadaan edullisesti ja pieneen tilaan suurivirtainen kuristin. Johtimena käytetään tällöin joko kupari- tai alumiinifoliota. Alumiinia käyttämällä saadaan tehtyä kuristimesta kevyt ja kustannuksiltaan halpa, vaikkei se pärjääkään sähkönsäilyvyydeltään kuparille. Toisaalta keveyden vuoksi johdinpoikkipinta-alaa voidaan lisätä ja pienentää resistiivisiä häiriöitä eikä paino kuitenkaan kasva yhtä suureksi kuin kuparia johtimena käytettäessä. Kuristimen häviöt voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan: resistiivisiin eli niinsanottuihin kuparihäviöihin sekä sydämen rautahäviöihin.

Foliokuristinta voidaan käyttää kun tarvittava induktanssi ja kierrosmäärä on melko pieni eli enintään kymmeniä kierroksia. [Niiranen, 1997] Leveiden foliokerrosten välillä on kuitenkin huomattava hajakapasitanssi ja yhtälön (3-11) sekä kuvan 3.3 mukaisesti kuristin näkyy piirissä suurilla taajuuksilla kondensaattorina eikä induktanssina, joten virran suurtaajuiset komponentit pääsevät lähes vaimentumatta kuristimen läpi. Tämä pätee siis selvästi kuristimen ominaisresonanssitaajuutta suuremmilla taajuuksilla. Tämän vuoksi tärkeänä osana suurtaajuusominaisuuksien parantamista tulee keskittyä kuristimen yli olevan hajakapasitanssin pienentämiseen ja kuristimen ominaisresonanssitaajuuden  $f_0$  saamiseen riittävän suureksi.

Varsinaiset sähköisten häiriöiden suodatuksen tarkoitetut kuristimet ovat yleensä vain yhteen kerrokseen käämittyjä muunmuassa juuri hajakapasitanssin pienentä-



miseksi. Niissä on kuitenkin aivan erilaiset ominaisuudet verrattuna tässä työssä käsiteltävään sovellukseen esimerkiksi virrankeston ja induktanssin suuruuden suhteen, eikä aivan samantyyppistä rakennetta voida siis käyttää. Kuristin voidaan kylläkin käämiä folion sijasta käämilangasta tai vaikkapa niinsanotusta Litz-langasta, joka koostuu useista ohuista toisistaan eristetyistä langoista, jotka on punottu yhteen. Tällöin ongelmaksi voivat tulla riittävän neliömäärän saaminen johtimeen ja resistiivisten häviöiden suuruus kuormitusvirran ollessa suuri. ”Useasta yhteen-punotusta ohuesta kuparilangasta valmistettuja Litz-lankoja käytetään suuremmilla taajuuksilla, mikäli muut konstit eivät riitä.” [Niiranen, 1997]

Lähivaikutusilmiöstä ja pyörrevirroista aiheutuvat häviöt pienenevät Litz-johtimia käytettäessä suurilla taajuuksilla eli ne soveltuvat käytettäväksi hyvin, kun halutaan johdotuksen tai tässä tapauksessa käämityksen toimivan hyvin suurilla taajuuksilla. Työssä käsitellään kuitenkin suurtaajuushäiriöiden estämistä, jolloin impedanssin kasvaminen suurilla taajuuksilla ei haittaa, koska suuret taajuudet eivät tällöin pääse kulkemaan yhtä hyvin kuristimen läpi kuin käyttämällä suurilla taajuuksilla hyvin toimivaa Litz-johdinta. Toisaalta Litz- tai kuparijohdinkäämitystä käytettäessä kuristimen hajakapasitanssi on pienempi kuin foliokuristimella ja siten myös kuristimen resonanssitaajuus on suurempi.

Suodatuksessa käytettävän kuristimen halutut ominaisuudet lähdeteoksen mukaan ovat seuraavat: [Snelling, 1969]

- oikea resonanssitaajuus, joka muuttuu ajan tai olosuhteiden mukaan mahdollisimman vähän
- mahdollisimman pienet tehohäviöt
- pienin mahdollinen koko ja hinta
- ominaisuuksien sopiva riippuvuus lämpötilasta

Samassa lähdeteoksessa on pohdittu kuristimen hyvyysluvun vaikutusta kuristimessa. Hyvyysluku määräytyy kuristimen sähköisistä suureista yhtälön (3-14) mukaisesti. Suuren hyvyysluvun eli Q-arvon omaavalla kuristimella saadaan pienemmät päästökaistan häviöt ja jyrkempi suodatus halutun päästökaistan ulkopuolella. Tällöin kuristimelta vaaditaan suurta tehollista permeabiliteettia ja pienet muutokset kuristimen valmistuksessa tai ympäristöolosuhteissa vaikuttavat enemmän induktanssiin kuin pienemmän permeabiliteetin materiaaleja käytettäessä (Q-arvo pieni). Tämän vuoksi käytännön suodatuskuristin on kompromissi näiden ääripäiden väliltä. Kuristinsydämen ferriittimateriaalin ominaisuudet muuttuvat riippuen lämpötilasta, ajasta, magneettivuontiheydestä, taajuudesta, magneettikentän voimakkuudesta sekä mekaanisesta rasituksesta. [Snelling, Giles 1983]

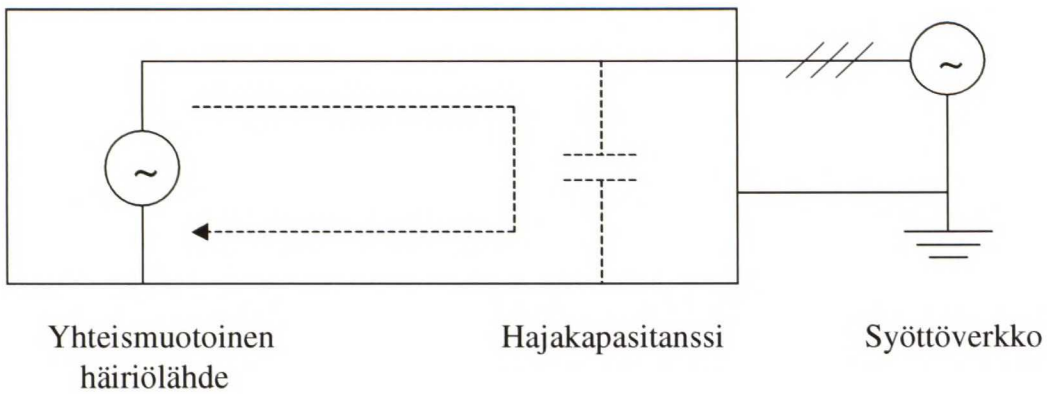
### 3.6 Hajakapasitanssi

Kuristimen hajakapasitanssin määrittämiseen on olemassa likimääräisiä kaavoja, mutta se on suositeltavampaa määrittää mittaamalla koska kaavat ovat pitkälti vain suuntaa-antavia. [Niiranen 1997, Snelling 1969] Kaavoja voidaan käyttää kuitenkin apuna laskettaessa miten hajakapasitanssi muuttuu esimerkiksi käämin kierrosmäärää muutettaessa. Käytännön laitteissa lisäksi asiaan vaikuttaa se, miten kuristin on asennettu ja mitä sen ympärillä on. Mikäli laitteen runko on valmistettu metallista, se on yleensä maadoitettu. Tällöin muodostuu hajakapasitanssia kuristimesta runkoon. Muodostuva hajakapasitanssi riippuu laitteen geometriasta, mutta sen tarkempi tarkastelu jätetään tämän diplomityön ulkopuolelle.

Hajakapasitanssi vaiheista maapotentiaaliin voi olla hyödyllinen suurilla taajuuksilla, jos se tuo samalla sopivan kulkureitin häiriövirroille eikä häiriö kulkeudu syöttöverkkoon vaan pysyy laitteen sisällä kuvan 3.6 mukaisesti. Suorakaiteen muotoinen laatikko esittää laitteen ulkokuoria. Kapasitanssi maahan nähden vaikuttaa erityisesti maajohdinta kulkutienä käyttävään yhteismuotoiseen häiriöön. Häiriön kulkureittiin vaikuttaa impedanssi, joka hajakapasitanssista aiheutuu häiriötaajuudella. Mitä pienempi impedanssi on häiriötaajuudella hajakapasitanssin kautta maapotentiaaliin ja takaisin häiriölähteelle sitä todennäköisemmin vältetään tilanteelta, että häiriö kulkeutuu syöttöverkkoon päin. Sopivansuuruinen hajakapasitanssi toimii tällöin suodatuskondensaattorin tavoin ja suodattaa tehokkaasti suurtaajuisia yhteismuotoisia häiriöitä. Taajuus, jolla hajakapasitanssi tuo pieni-impedanssisen reitin maapotentiaaliin, määräytyy hajakapasitanssin suuruudesta ja muista kytkennässä esiintyvistä hajasuureista kuten esimerkiksi maadoituksen hajainduktanssista.

Kuristimen johtimien pyörrevirta- ja lähivaikutusilmiöt aiheuttavat käämiin häviöitä suurilla taajuuksilla, mikä voi myös olla hyödyllistä johtuvien häiriöiden estämisessä. Nämä epäideaalisuudet lisäävät syöttöverkon ja taajuusmuuttajan tulosillan välistä resistanssia suurilla taajuuksilla ja jos samalla (yhteismuotoiselle) häiriölle on olemassa pienempi-impedanssinen reitti kuvan 3.6 mukaisesti saadaan häiriöiden kulkeutuminen syöttöverkkoon päin paremmin estettyä. Vastus sitoo lisäksi häiriöenergiaa lämmöksi. Häiriöitä torjuttaessa pitää samalla huolehtia myös siitä, että laitteessa käytettävä maadoitus on tehty hyvin. Heikko maadoitus aiheuttaa potentiaalieroja laitteen eri osien välille muunmuassa maadoituksen hajainduktanssin vuoksi. Tämä potentiaaliero on myös yksi yhteismuotoisten häiriöiden aiheuttajista.





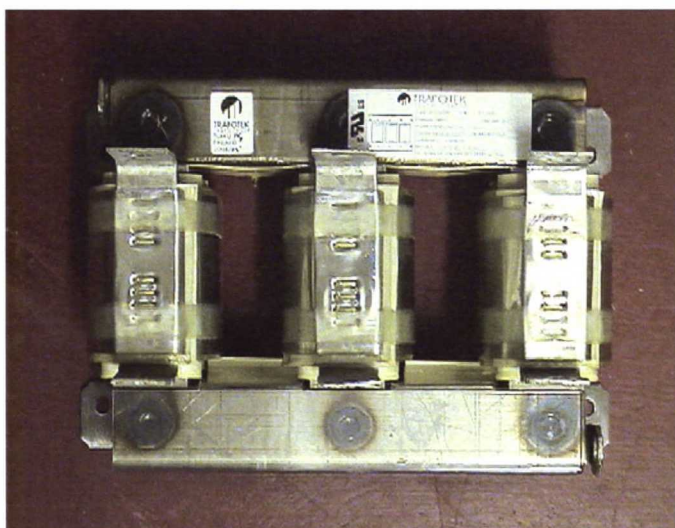
Kuva 3.6. Häiriön suotuisa kulkureitti hajakapasitanssin kautta. Suorakaiteen muotoinen laatikko kuvaa laitteen ulkokuorta.

### 3.7 Tarkasteltavat kuristimet

Diplomityössä tarkastellaan erilaisia kolmivaihekuristimia, joiden induktanssi on välillä 0,11 – 0,115 mH. Kuristimien mitoituksessa käytetty virta  $I_N$  on noin 350 ampeeria ja jännite 500 voltia. Nimellisvirtaa suuremmalla virralla kuristimen rautasydän kyllästyy ja kuristimen induktanssi pienenee. Kuristimien käämintatapana on kuristimesta riippuen joko foliokäämitys tai muotokuparikäämitys. Nimellisinduktanssi erityyppisillä kuristimilla on samaa luokkaa, mutta erilaiset käämintatavat vaikuttavat kuristimen suurtaajuusominaisuuksiin. Kuten kappaleessa 3.6 todettiin, foliokuristimen hajakapasitanssi on melko suuri eikä se ole suurilla taajuuksilla häiriöiden estämisen kannalta hyödyksi, koska tällöin suurilla taajuuksilla kuristin toimii kondensaattorin tavoin ja kuristimen impedanssi pienenee taajuuden kasvaessa. Foliokuristin on muilta ominaisuuksiltaan, esimerkiksi virrankestoltaan ja kooltaan, taajuusmuuttajan tulokuristimeksi sopiva, joten sitä käytetään paljon. Siksi myös tässä diplomityössä tarkasteltavat kuristimet ovat suurimmaksi osaksi foliokuristimia ja kaikissa kuristimissa käytetään samantapaista kolmivaihesydäntä.

Diplomityötä varten teetettiin prototyyppikuristin Trafotek Oy:llä. Teetettyyn foliokuristimeen on lisätty ylimääräinen maadoitettu foliokerros kuristimen varsinaisten johdinkerrosten väliin. Vastaavanlaista rakennetta eli niinsanottua staattista suojaa käytetään esimerkiksi muuntajissa. Tällä pyritään estämään suurtaajuisien häiriöiden siirtymistä kapasitiivisesti johdinkerroksesta seuraavaan. Samalla maadoitettu lisäfoliokerros aiheuttaa sen, että hajakapasitanssi kuristimen kolmesta vaiheesta maapotentiaaliin nähden suurenee. Mitattaessa kapasitanssia lisämaadoituksella varustetun foliokuristimen vaiheista maapotentiaaliin saadaan tulokseksi noin 100 nF, kun muilla tässä diplomityössä mitatuilla kuristimilla kapasitanssi maapotentiaaliin on alle yhden nanofaradin. Tämä hajakapasitanssi tuo suurtaajuusvirralla pienempi-impedanssisen kulkutien vaihejohtimista maapotentiaaliin kuin muilla kuristimilla. Häiriöiden suodatuksen kannalta tämä kuristin toimii siis parhaassa tapauksessa kuvan 3.6 mukaisesti.

Mitattavat kuristimet on valittu siten, että muotokuparilla käämityn kuristimen kanssa samoilla induktanssi- ja virtakestoisuusarvoilla oli vertailtavana yksi normaali foliokuristin. Kuristimissa käytetään myös samanlaista rautasydäntä. Lisämaadoituksella varustetun foliokuristimen kanssa oli myös vertailtavana vastaavilla mitoitusarvoilla ja samanlaisella sydämellä varustettu tavallinen foliokuristin. Yleisesti kaikkia kuristimia voidaan tietysti vertailla myös keskenään vaikeivät induktanssiarvot täysin samat olekaan. Kuvassa 3.7 on esimerkkinä yksi mitatuista kolmivaiheisista foliokuristimista. Kuristimen kolmella vaiheella on yhteinen rautalevyistä tehty sydän. Käyttämällä sydänmateriaalina useita ohuita rautalevyjä puristettuina yhteen, pystytään kuristimen pyörrevirtahäviöitä rajoittamaan.

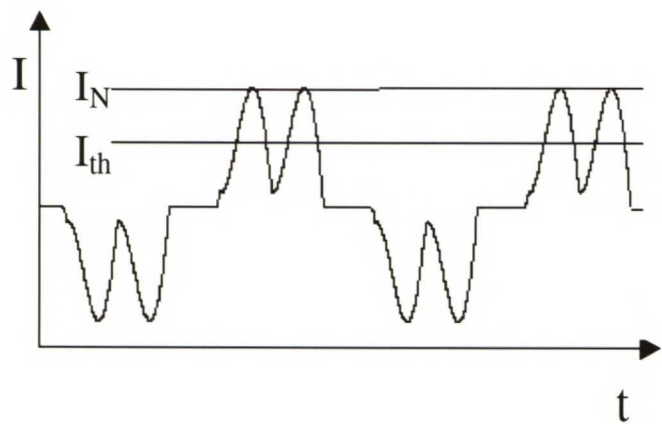


Kuva 3.7. 0,11 mH foliokuristin

Taulukossa 3.1 on esitetty tutkittavien kuristimien ominaisuuksia ja mitoitusarvoja. Kuvassa 3.8 on kuvattu kolmivaihekuristimen yhden vaiheen virta ajan funktiona, kun kuormituksena on kuusipulssinen diodisilta.  $I_N$  on kuristimen nimellisvirta ja  $I_{th}$  on jatkuvan käytön mitoituksessa käytetty keskimääräinen virta.  $I_N$  ja  $I_{th}$  vastaavat taulukossa 3.1 esitettyjä kuristimen mitoituksessa käytettäviä virtoja.

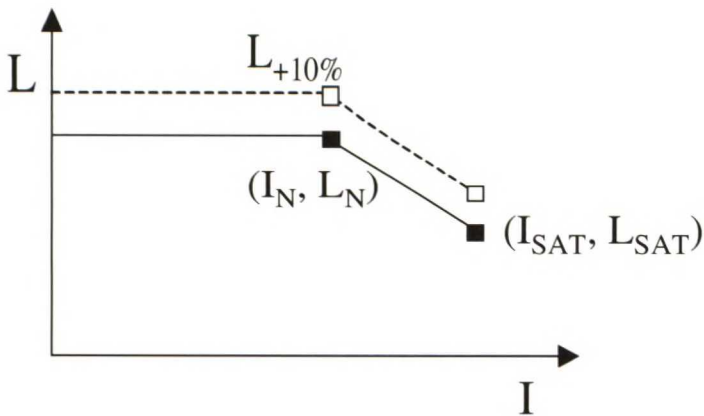
Taulukko 3.1. Mitattujen kuristimien nimellisarvoja.

Kuristintyyppi (käämintätapa)	Induktanssi $L_N$ [mH]	Nimellisvirta $I_N$ [A]	Induktanssi $L_{SAT}$ [mH]	Kyllästymisvirta $I_{SAT}$ [A]	Jatkuva kuormi- tusvirta $I_{th}$ [A]
Foliokuristin	0,11	335	0,075	395	190
Foliokuristin lisä- maadoituksella	0,11	335	0,075	395	190
Foliokuristin	0,115	349	0,09	451	189
Muotokupari- käämitty kuristin	0,115	349	0,09	451	189



Kuva 3.8. Kolmivaihekuristimen virta taajuusmuuttajan kuusipulssisella diodisillalla kuormitettaessa.

Mitattujen kuristinten induktanssit on määritelty siten, että valmistustoleranssi on nimellisarvoon nähden  $\pm 0...+ 10 \%$ . Tähän on syynä se, että mitoittaessa kuristinta esimerkiksi harmonisten häiriöiden estämisen suhteen, halutaan kuristimella olevan aina vähintään (laskettu) nimellisinduktanssi. Tällöin kuristin vaimentaa harmonisia häiriöitä aina vähintäänkin riittävästi. Kuvassa 3.9 on merkitty katkoviivalla käyrä, jossa induktanssin nimellisarvoon on lisätty  $+10 \%$  valmistustoleranssi. Kuristimen saturaatiopisteen virta- ja induktanssiarvot määritetään kyseessäolevan kuristimen tai laitteen suunnitteluvaiheessa.



Kuva 3.9. Kuristimen induktanssi määritettynä virran funktiona.



## 4 MITTAUKSET

### 4.1 Mittalaitteet

Johtuvat häiriöt mitataan Rohde/Schwarz EMI Test Receiver ESS mittalaitteella. Mittalaite on tarkka ja sillä on erittäin laaja dynaaminen mittausalue (5 Hz – 1 GHz). Standardeissa määritetystä johtuvien häiriöiden mittaustavasta johtuen vaihevastetta ei kuitenkaan saada mitattua tällä mittalaitteella.

Työssä mitataan myös suurtaajuuden vaihtojännitteen vaimentumista kuristimen läpi kulkiessa, jolloin käytetään mittalaitteena oskilloskooppia. Oskilloskoopeissa mainostetaan monesti gigahertsien taajuuskaistaa, vaikka näytteenottotaajuus on todellisuudessa esimerkiksi vain kymmeniä megahertsejä. Tämä johtuu kustannuksista, koska tarpeeksi nopean näytteenoton ja mitta-arvojen käsittelyn omaavat laitteet ovat kalliita. Jaksollisissa toistuvissa signaaleissa pystytään kyllä erottamaan suurempiakin taajuuksia käyttäen esimerkiksi satunnaisesti toistuvaa mittaustapaa. Riittävää tarkkuutta ei tällä tavoin saavuteta jos mitattava signaali tai häiriö on pulssiluonteinen. [Silventoinen, 2001] Tehtävissä mittauksissa keskitytään alle kymmenen megahertsin taajuuksiin, jolloin oskilloskoopillakin saadaan riittävän tarkkoja tuloksia.

Simuloitaessa suurtaajuushäiriöitä tarvitaan signaalilähde, joka ei saa ylikuormittua, jolloin signaalin amplitudi pienenee mittausvirran kasvaessa. Rohde/Schwarz ESS mittalaitteessa on myös sisäänrakennettu signaaligeneraattori, jonka avulla voitaisiin siis myös mitata komponenttien väliinkytkemiskerroin desibeleissä taajuuden funktiona. Väliinkytkemiskertoimen mittaukset tehtiin kuitenkin käyttämällä erillistä signaaligeneraattoria ja oskilloskooppia.

Kuristimien vastuksen määrittämiseen käytetään resistanssimittaria, jonka tarkkuus riittää pienien, milliohmien luokkaa olevien resistanssien mittaamiseen.

Induktanssin, kapasitanssin ja resistanssin mittaamiseen tarkoitetut LCR-mittarit soveltuvat myös kuristimen impedanssin mittaamiseen. Mittaustarkkuuden vuoksi monessa LCR-mittarissa käytetään nelijohdinmittausta, jolloin mittajohtimien vaikutus mittaustulokseen saadaan poistettua. Nykyisin on olemassa LCR-mittareita, joiden suurin käytettävissä oleva mittaustaajuus on jopa kymmeniä megahertsejä. Diplomityössä käytettyjen HP 4274A ja Philips PM 6304 LCR-mittareiden suurin mittaustaajuus on 100 kHz.

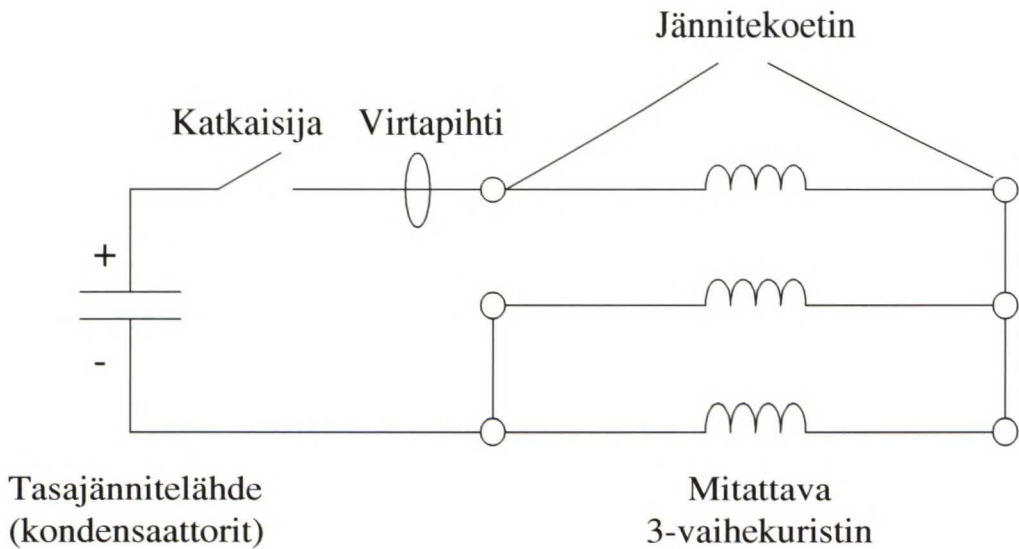
### 4.2 Induktanssin mittaus jännitepulssilla

Induktanssin mittauksessa käytetään jännitepulssia, joka saadaan aikaan purkamalla kondensaattoreihin ladattu varaus. Kondensaattorien tasajännitteen suuruus voidaan

säätää halutuksi. Jännitelähteen eli tässä tapauksessa kondensaattorien sisäisen resistanssin tulee olla mahdollisimman pieni, jotta mittaustulokset ovat tarkkoja. Induktanssi saadaan mitattua oskilloskoopilla jännitteen sekä virran muutosnopeuden avulla yhtälön (3-4) mukaisesti. Tarvittaessa laskelmissa voidaan ottaa huomioon myös kondensaattorien sisäinen vastus  $R_c$ , jolloin mittaustuloksesta saadaan vielä hieman tarkempi käyttämällä yhtälöä (4-1) edellä esitetyn yhtälön (3-4) sijaan.

$$L = \frac{u_j - R_c * i}{di / dt} \quad (4-1)$$

Kuvassa 4.1 on hahmotelma mittauskytkennästä, jolla mitataan induktanssin suuruutta jännitepulsseilla. Kondensaattoreihin ladataan ensin sopiva tasajännite, esimerkiksi noin 30 – 80 voltia. Katkaisijalla kytketään sen jälkeen jännite mitattavaan kuristimeen, jolloin kuristimen virta kasvaa induktanssin suuruudesta riippuvalla nopeudella yhtälön (3-5) mukaisesti. Katkaisijan johtamisaika on sovitettava sellaiseksi, ettei kuristimeen syötetä liian suurta virtaa. Kuristimet kestävät hetkellisesti kuitenkin moninkertaisen virran verrattuna mitoituksessa käytettyyn jatkuvaan virtaan.



Kuva 4.1. Kuristimen induktanssimittauksen kytkentä.

Mittaamalla kuristimelle menevä virta sekä jännite mitattavan vaiheen yli saadaan määritettyä induktanssi. Mittauskytkennässä virtapulssi kytketään myös kulkemaan muista kahdesta vaiheesta takaisinpäin jännitelähteelle. Käytännön laitteessa kuormitustilanteessa kuristimen virta kulkee yhdestä yhdestä vaiheesta laitteelle päin ja kahdesta muusta vaiheesta takaisin syöttöpuolelle. Toimintatilanteessa virta kulkee kolmivaiheiseen syöttöverkkoon päin tietyllä hetkellä vain jompaa kumpaa muista vaiheista, mutta tarvittavien mittauskertojen vähentämiseksi mitataan vain tapaus, jossa kaksi vaihetta ovat rinnankytkettyinä. Tällöin saadaan selville keskimääräinen tulos näistä kahdesta eri kytkentävaihtoehdosta. Joka tapauksessa mitattava vaihe on se, johon on kytketty tasajännitelähteen + napa eli kuvan 4.1 tapauksessa tarkas-



tellaan kuvassa ylimpänä olevaa vaihetta ja vain sen yli olevaa jännitettä ja siinä kulkevaa virtaa mitataan.

### 4.3 Taajuus- ja vaihevasteen mittauskytkentä

Taajuusvasteen mittaukset tehtiin useammalla eri mittaustavalla, jotta voidaan samalla arvioida testien luotettavuutta. Ensiksi mitattiin impedanssi yksittäisillä taajuuksilla LCR-mittarilla HP 4274A. Kyseisen mittalaitteen suurin mittaustaajuus on 100 kHz, joten tällä mittaustavalla ei päästä vielä johtuvia EMC-häiriöitä tutkittaessa kiinnostavalle taajuusalueelle, joka alkaa 150 kilohertsistä.

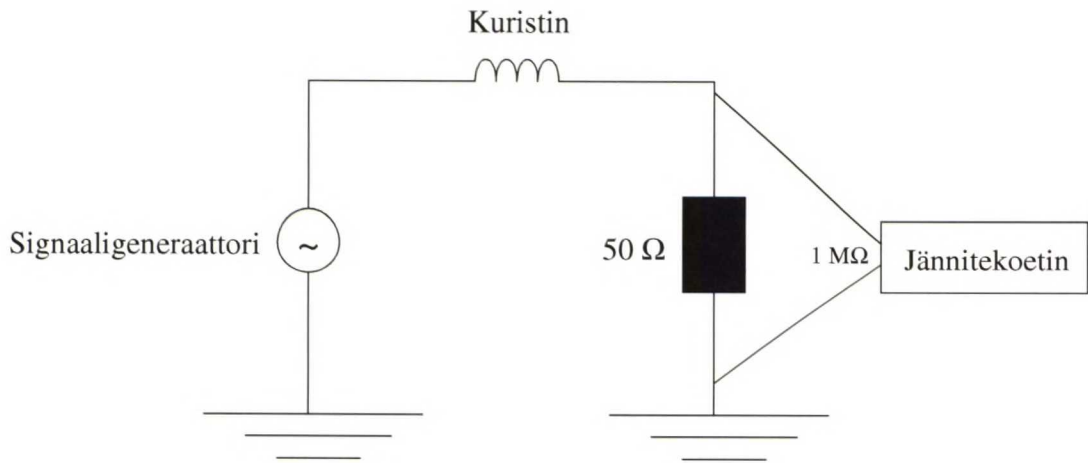
Toisessa mittaustavassa käytetään signaaligeneraattoria suurtaajuisena jännitelähteenä ja oskilloskooppia mittaamaan eritaajuisien signaalien vaimentumista kuristimen läpi kuljettuaan. Samalla saadaan selville myös kuristimen aiheuttama vaihesiirtymä signaalissa. Oskilloskoopilla voidaan myös mitata ja varmistaa signaaligeneraattorin ulostulojännitteen pysyminen samansuuruisena, vaikka siihen liitetään kuormitusta eli kuristin ja muu mittauskytkentä. Tarvittaessa signaalin amplitudia säädetään niin, että päästään määritellylle testisignaalin tasolle. Signaalitasoa joudutaankin käytännössä säätämään taajuutta muutettaessa. Tähän on syynä se, että signaaligeneraattorin ulostuloimpedanssi on koko ajan  $50\ \Omega$ , mutta kuristimen sekä  $50\ \Omega$  mittavastuksen aiheuttama kuormaimpedanssi muuttuu.

Testisignaalina käytetään sinimuotoista vaihtojännitettä, jonka amplitudi on 5 voltia signaaligeneraattorin ulostulosta mitattuna. Tämä on johtuvien häiriöiden mittauksissa käytettävänä yksiköinä  $134\ \text{dB}\mu\text{V}$ , joka on suurinpiirtein samaa luokkaa liitteestä D löytyvien taajuusmuuttajalla tehtyjen johtuvien häiriöiden häiriötasojen kanssa.

Mittaimpedanssina on kaikissa jännitemittauksissa  $50\ \Omega$  mitattavasta vaiheesta maapotentiaaliin. Lisäksi signaaligeneraattorin ulostuloimpedanssi on myös  $50\ \Omega$ . Kolmivaihekuristimesta mitataan yhtä vaihetta kerrallaan ja muut vaiheet ovat liitettyinä  $50\ \Omega$  vastusten kautta maapotentiaaliin molemmista päistään. Mittauskytkennässä tarvitaan kaikkiaan viisi kappaletta  $50\ \Omega$  ohmin vastuksia. Mitattaessa näiden viiden eri vastuksen resistanssi todettiin vastusarvojen olevan välillä  $49,97 - 50,04\ \Omega$ . Tämä aiheuttaa siis mittaukseen noin prosentin suuruisen epätarkkuuden.

Mittauksissa käytetään alustana maadoitettua metallilevyä, johon kuristin on kiinnitetty. Kuvaan 4.2 piirretyt 2 maapotentiaalia ovat siis samassa maadoitetussa noin  $50\ \text{x}\ 50\ \text{cm}$  kokoisessa metallilevyssä.



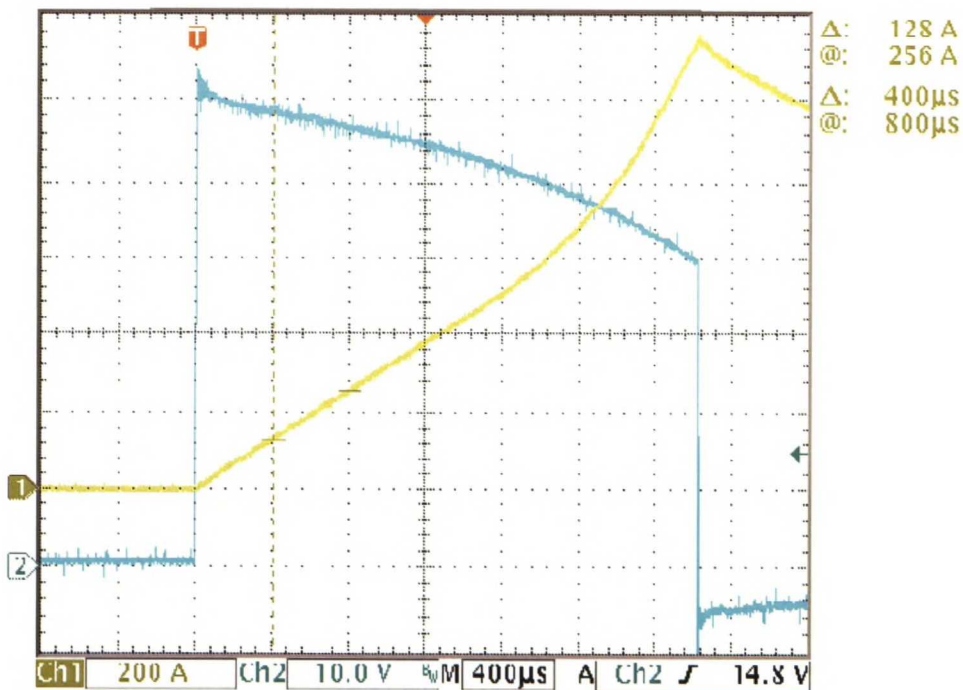


Kuva 4.2. Mittauskytkentä

## 4.4 Mittaustulokset

### 4.4.1 Induktanssimittaukset

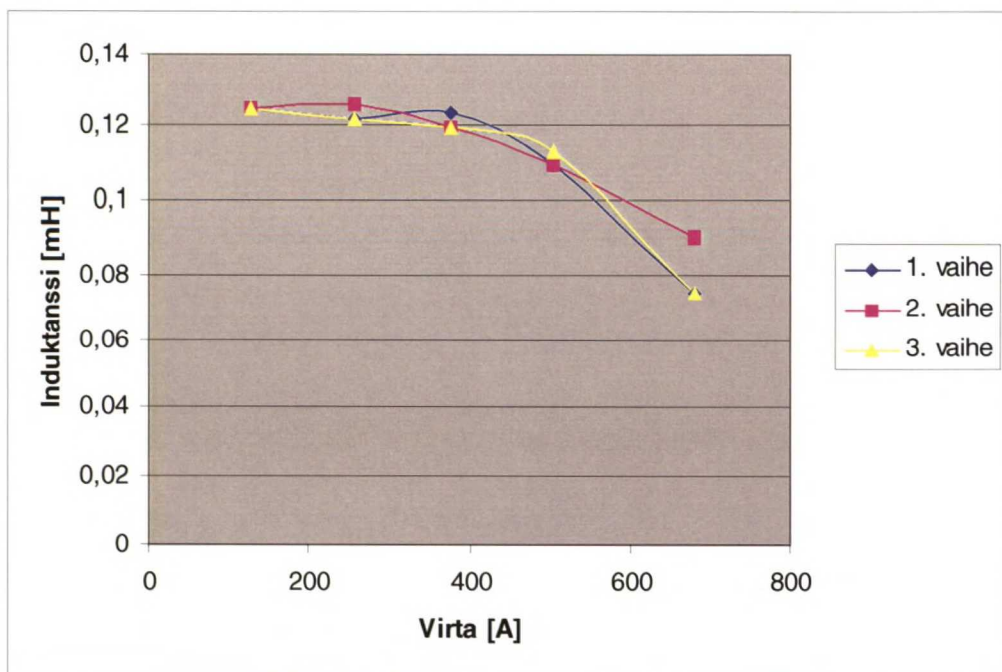
Induktanssimittaukset on tehty kappaleessa 4.2 kerrotun menetelmän mukaisesti. Oskilloskooppiin on kytketty jännitteen mittauskoetin ja virtapihti, joilla saadaan mitattua kuristimen jännite ja virta. Kuva 4.3 on oskilloskoopin ruudulta mittauksesta. Ruudulta luetaan jännitteen sekä virran arvot ja lasketaan niiden perusteella induktanssin suuruus yhtälön (3-4) mukaisesti. Kuvassa sinisellä piirretty käyrä on kuristimen yhden vaihekäämin yli mitattu jännite ja keltainen käyrä on virta. Induktanssi pienenee, kun virta on kasvanut niin suureksi että kuristimen rautasydän kyllästyy. Tämä näkyy mittauksessa siten, että virran kasvunopeus suurenee eli kuvassa olevan virran kuvaajan kulmakerroin suurenee.



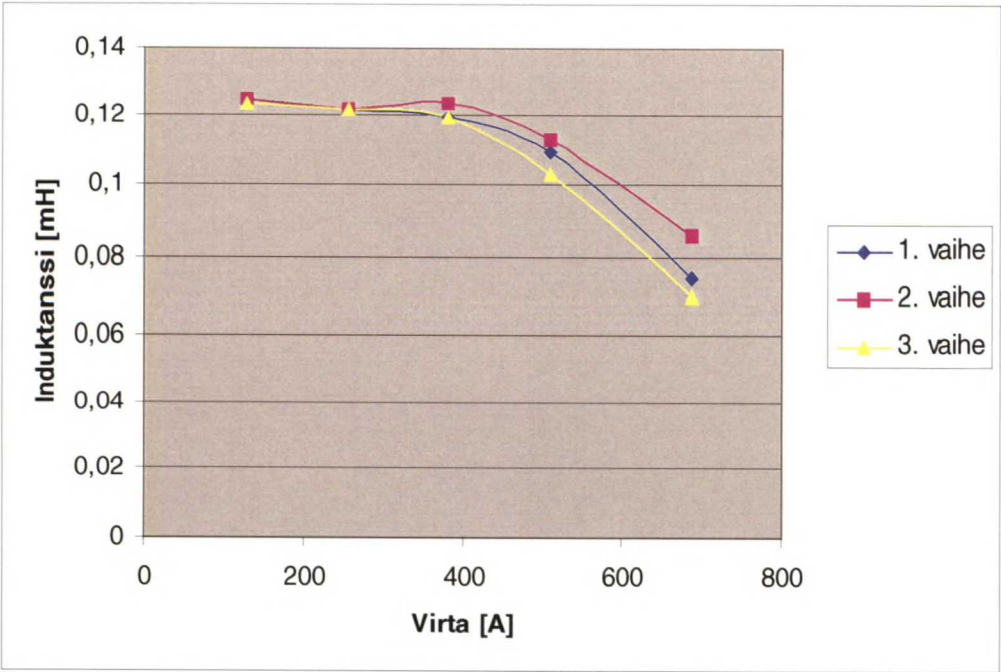
Kuva 4.3. Induktanssimittauksen kuva oskilloskoopin ruudulta

Kuvissa 4.4-4.7 näkyvät induktanssimittausten tulokset. Kuristinten induktanssi on piirretty virran funktiona. Tarkemmat mittaustulokset numeroarvoina ovat liitteessä A. Mitattujen kolmivaihekuristimien induktanssit on määritelty siten, että valmistustoleranssi on nimellisarvoon nähden  $\pm 0...+10\%$ . Tämän vuoksi mitattujen kuristinten induktanssit ovat hieman suurempia kuin induktanssin nimellisarvot. Kuristimien kyllästyminen näkyy selvästi induktanssiarvojen pienenemisenä, kun virta ylittää kuristimen nimellisvirran, joka mitatuilla kuristimilla on noin 350 ampeeria.

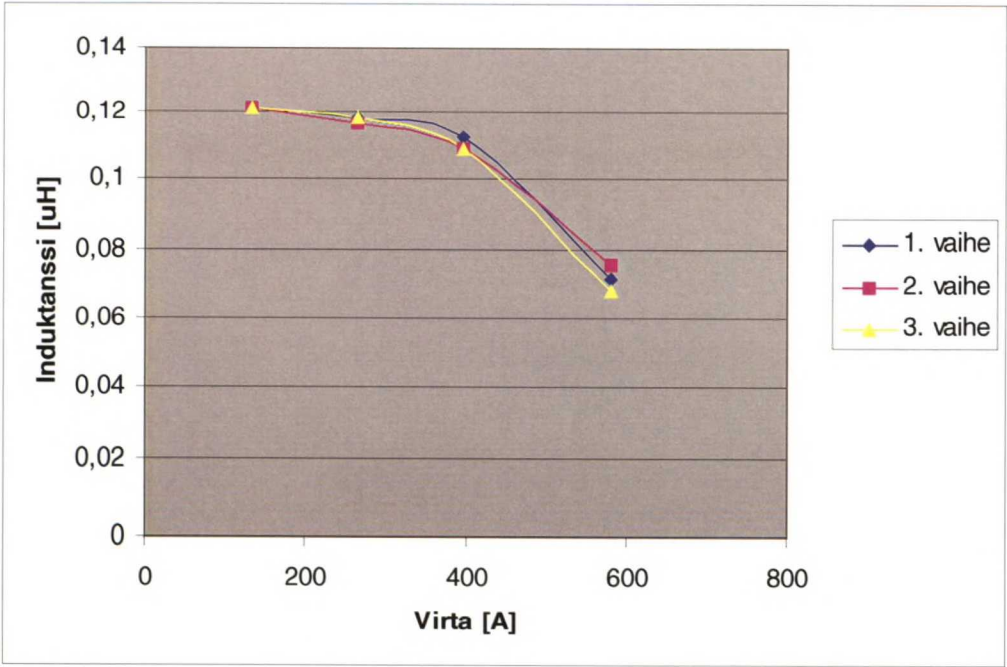
Kuten taulukosta 3.1. käy ilmi, 0,115 mH kuristimien määritellyn kyllästymispisteen virta  $I_{SAT}$  ja induktanssi  $L_{SAT}$  ovat suuremmat kuin 0,11 mH kuristimilla. Tämä näkyy myös käytännön mittauksissa, sillä 0,115 mH kuristimen kyllästyessä induktanssiarvo pienenee virran kasvaessa hitaammin kuin 0,11 mH kuristimilla.



Kuva 4.4. 0,115 mH foliokuristimen induktanssi virran funktiona

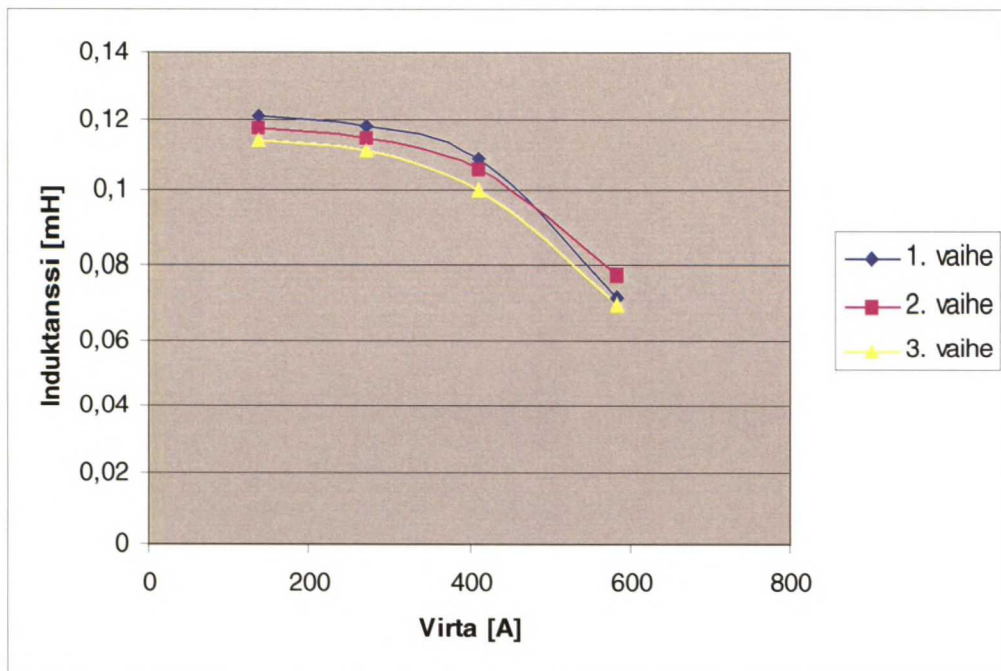


Kuva 4.5. 0,115 mH muotokuparikäämityn kuristimen induktanssi virran funktiona



Kuva 4.6. 0,11 mH foliokuristimen induktanssi virran funktiona





Kuva 4.7. 0,11 mH lisämaadoituksellisen foliokuristimen induktanssi virran funktiona

#### 4.4.2 Impedanssimittaukset

Kuvissa 4.8-4.10 nähdään eri kuristinten impedanssi taajuuden funktiona. Impedanssi mitattiin tasajännitteellä ja lisäksi vaihtojännitteellä taajuuksilla 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 20 kHz ja 100 kHz. Näillä taajuuksilla impedanssi suurenee taajuuden kasvaessa, muttei pelkästään induktanssin ja taajuuden funktiona kuten ideaalisessa kuristimessa. Kuvasta on havaittavissa, että kulmakerroin on aluksi suurempi ja pienenee kun taajuus kasvaa kymmenien kilohertsien alueelle. Tasajännitteellä resistanssi on noin kolmen milliohmin luokkaa. Suurilla taajuuksilla impedanssin kasvua hidastaa kuristimien hajakapasitanssi ja induktanssin pienentyminen raudan pyörrevirtojen vuoksi. Tarkemmat mittaustulokset ovat liitteessä B.

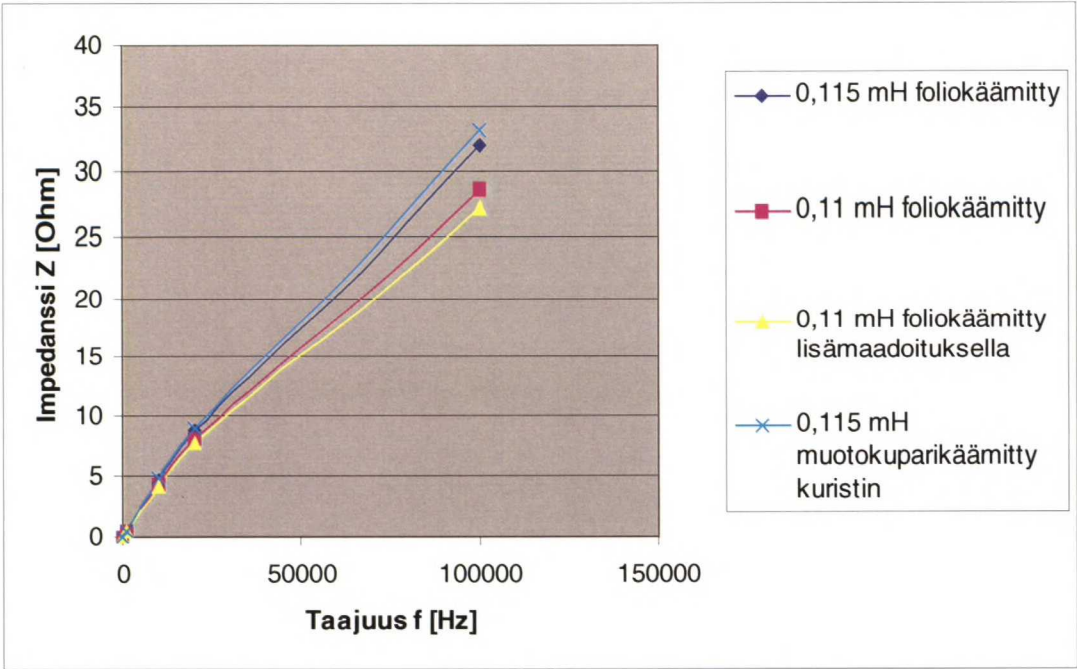
Käytössä olleiden LCR-mittarien suurin mittaustaajuus on 100 kHz, joten johtuvien EMC-häiriöiden kannalta näillä mittareilla ei päästä vielä kiinnostavalle taajuusalueelle. Standardeissa EN 61800-3, EN 55011 ja EN 55022 määritelty johtuvien häiriöiden mitattava taajuuskaista on 150 kHz - 30 MHz. Mittaukset tehtiin 0,115 mH foliokuristimen osalta molemmilla LCR-mittareilla, mutta koska molemmat antoivat niin samankaltaisia tuloksia, mitattiin loput kuristimet ainoastaan HP 4274A mittarilla. Mittaustulosten erot olivat alle yhden prosentin eli ovat mittalaitteiden mittaustarkkuuden suuruusluokkaa. Taulukossa 4.1 on eri mittarien impedanssinäyttämän erotus prosentteina laskettuna yhtälöllä (4-2).  $Z_{HP}$  on HP 4274A mittarilla saatu impedanssiarvo ja  $Z_{Philips}$  vastaavasti Philips PM 6304 mittarilla saatu tulos.

$$\frac{Z_{HP} - Z_{Philips}}{Z_{Philips}} * 100\%$$

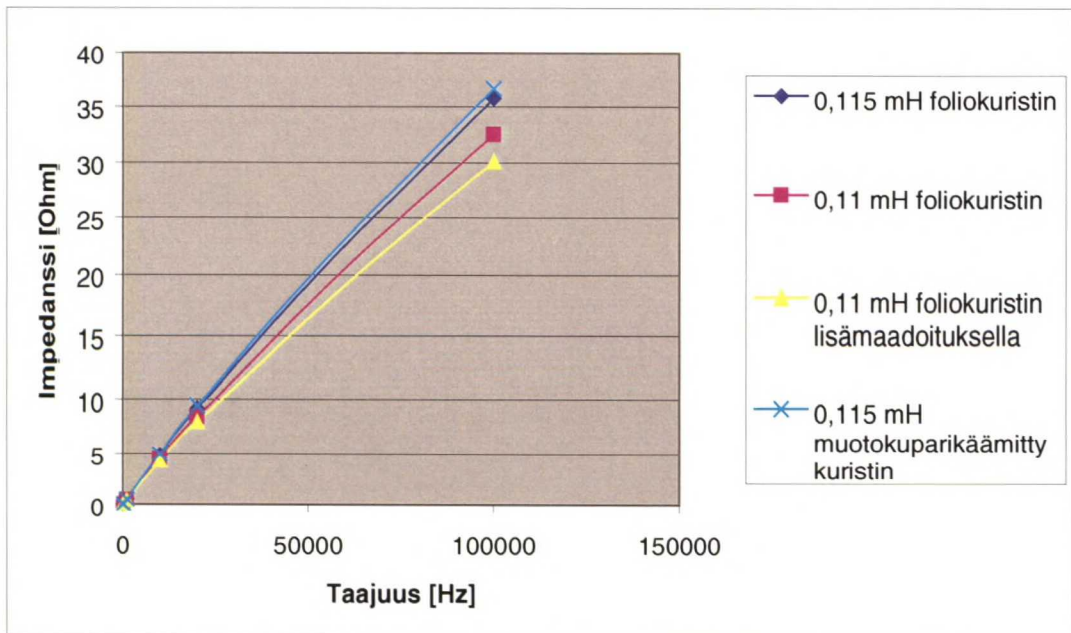
(4-2)

Taulukko 4.1. HP ja Philips LCR-mittareilla mitattujen impedanssiarvojen suhteellinen ero prosentteina taajuuden funktiona.

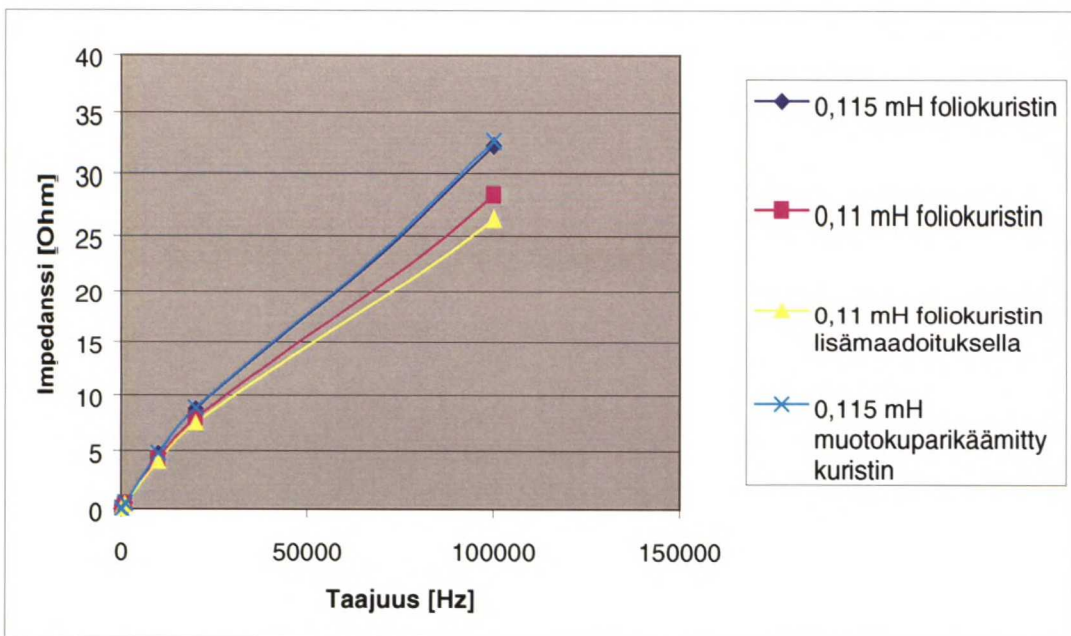
f [Hz]	100	1000	10000	20000	100000
1. vaihe [%]	0	0,775	0,642	0,815	0,819
2. vaihe [%]	0	0,565	0,613	0,546	0,449
3. vaihe [%]	0	0,765	0,634	0,806	0,813



Kuva 4.8. Kuristimien impedanssi taajuuden funktiona 1. vaihe



Kuva 4.9. Kuristimien impedanssi taajuuden funktiona 2. vaihe



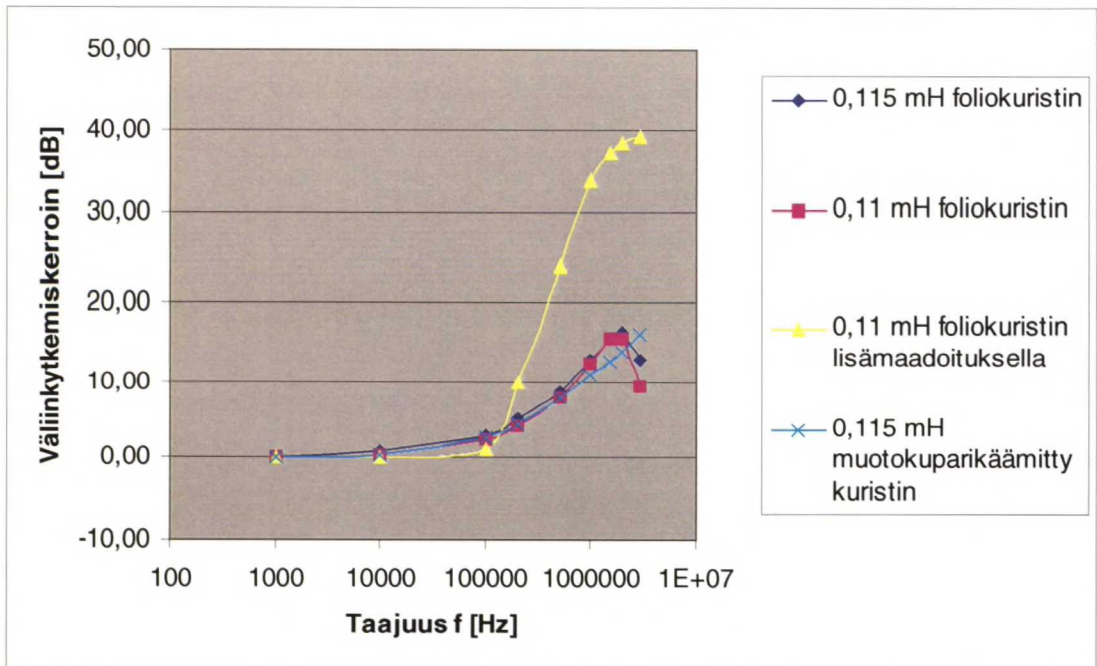
Kuva 4.10. Kuristimien impedanssi taajuuden funktiona 3. vaihe

Kuristimien impedanssikäyrien kulmakertoimista näkee, että 0,11 mH ja 0,115 mH kuristimien nimellinen induktanssiarvo ei ole keskenään aivan sama. Tämän takia suuremman induktanssin omaavien 0,115 mH kuristimien impedanssi kasvaa hieman nopeammin taajuuden suuretessa. 100 kilohertsin taajuudella eri kuristimien väliset impedanssierot ovat enimmillään noin 20 prosentin luokkaa suhteissa toisiinsa. Ero on siis hieman suurempi kuin kuristimien nimellisarvoista voisi päätellä, muttei kuitenkaan vielä ratkaiseva ero johtuvien häiriöiden estämisen kannalta, koska impedanssit ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa. Kahdenkymmenen prosentin ero vastaa 1,6 desibeliä.

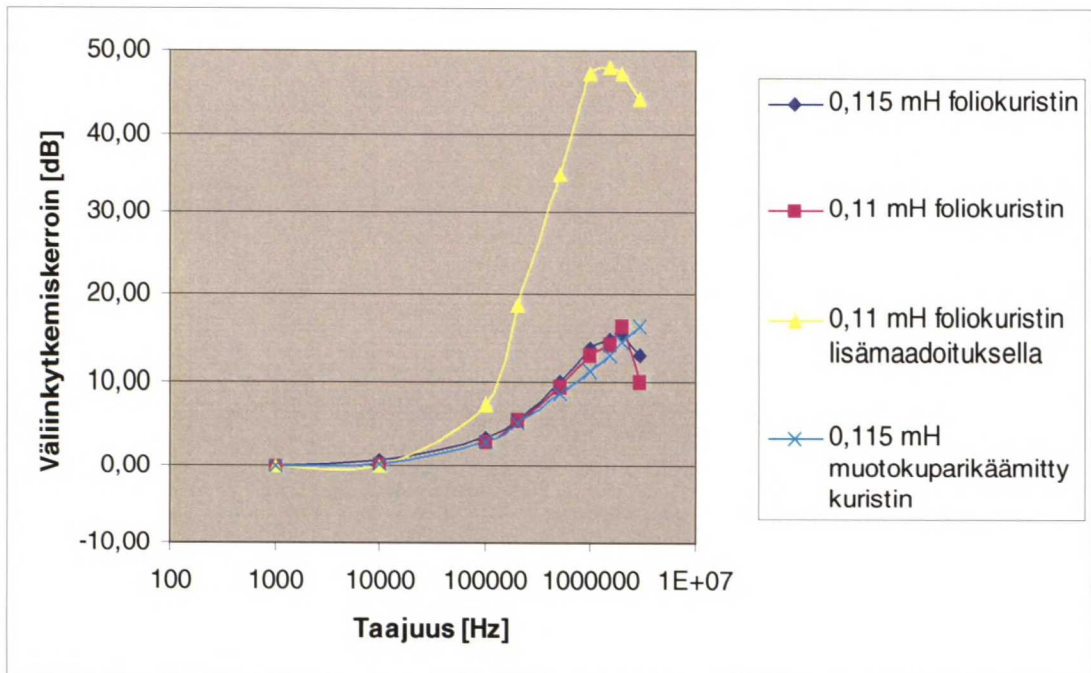


### 4.4.3 Väliinkytkemiskertoimen mittaukset

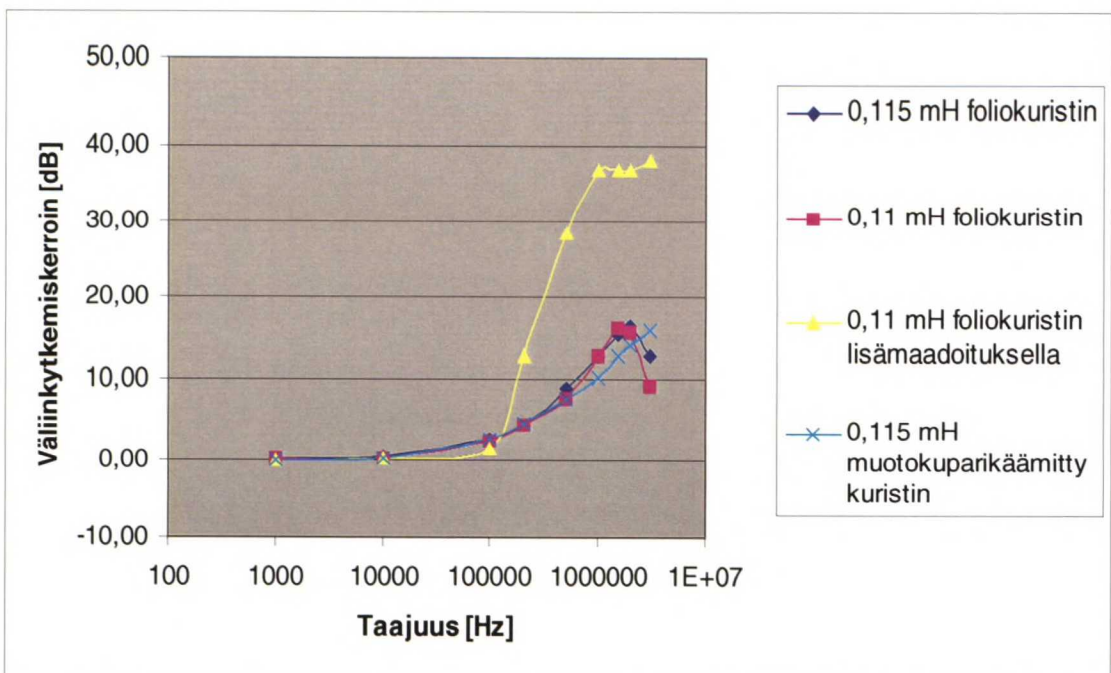
Sinimuotoisen jännitteen vaimenemista kuristimia käytettäessä mitattiin kappaleessa 4.3 selostetulla tavalla ja mittaustulosten analysointi jännitemittausten perusteella tehtiin käyttäen yhtälöä (3-18). Tällä tavoin saatiin selvitettyä kuristimien väliinkytkemiskerroin taajuuden funktiona. Väliinkytkemiskerroin riippuu paitsi mitattavasta laitteesta tai komponentista myös syöttö- ja kuormituspuolella olevista impedansseista eli saatu käyrä koskee tilannetta, jossa kuristimen molemmilla puolilla impedanssi vaihejohtimista maapotentiaaliin on  $50\ \Omega$ . Erilaisilla suurimmaksi osaksi resistiivisillä impedansseilla väliinkytkemiskerroinkäyrä on samanmuotoinen, vaikka vaimennuksen suuruus muuttuukin impedanssin mukaan. Sitävastoin mikäli impedanssi sisältää merkittävästi kapasitanssia tai induktanssia, saattaa käyrämuoto muuttua ja aiheuttaa erilaisia resonansseja. Käytännön laitteiden suunnittelussa tämä on luonnollisesti otettava huomioon tutkimalla laitteen eri osien sähköisiä ominaisuuksia, jotta haitallisilta resonansseilta vältytään.



Kuva 4.11. Kuristimien väliinkytkemiskerroin kuvattuna taajuuden funktiona 1. vaihe.



Kuva 4.12. Kuristimien väliinkytkemiskerroin kuvattuna taajuuden funktiona, 2. vaihe.



Kuva 4.13. Kuristimien väliinkytkemiskerroin kuvattuna taajuuden funktiona, 3. vaihe.

Kuvista 4.11-4.13 näkee, että kaikkien foliokuristimien maksimivaimennus saadaan noin 1,5 - 2 megahertsin taajuudella. Sen sijaan muotokuparista käämityn kuristimen vaimennus kasvaa vielä kolmen megahertsin kohdalla taajuuden suurentuessa. Mittaustaajuutta ei kasvatettu yli kolmen megahertsin, joten muotokuparikuristimen resonanssitaajuutta ei saatu selville. Syynä olivat pääasiallinen keskittyminen taajuuksiin 0,15 – 2 MHz. Lisäksi taajuuden suurentuessa myös mittauksessa esiintyvät häiriöt kasvavat. Tätä asiaa on tarkemmin käsitelty kappaleessa 4.4.5. Kaikki mitatut kuristimet toimivat hyvin samalla tavoin sadan kilohertsin taajuuteen

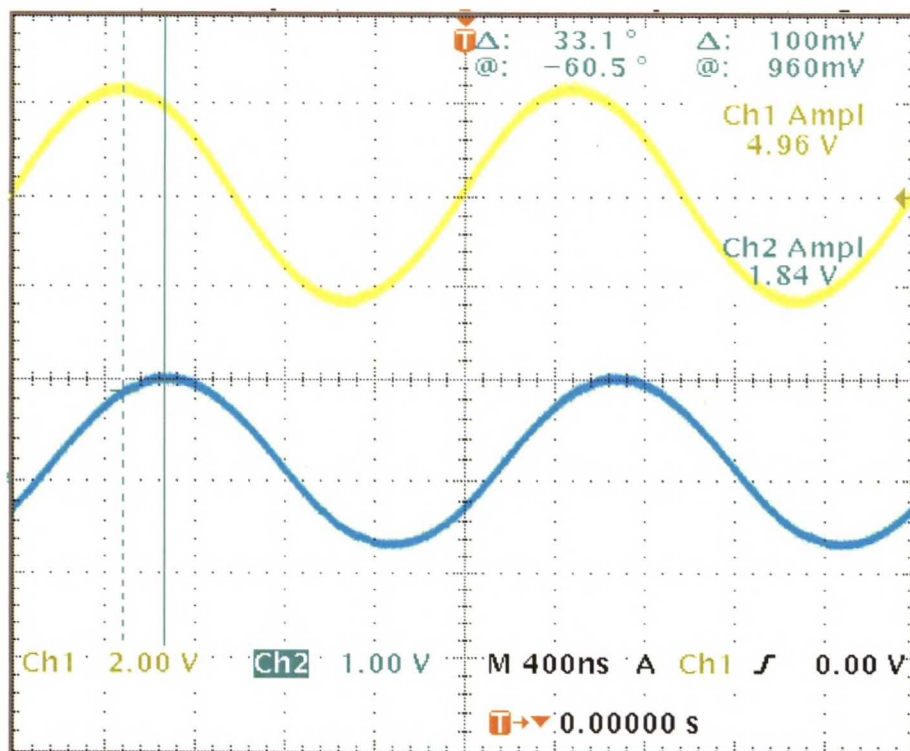
asti eikä suuria eroja vielä esiinny. Tarkemmat mittaustulokset numeroarvoina löytyvät diplomityön liitteestä C.

Vaimennuksen suuruus lisämaadoituksella varustetulla foliokuristimella on omaa luokkaansa muihin verrattuna. Tämän kuristimen vaimennus on ensimmäisessä ja kolmannessa vaiheessa lähes 40 dB, kun taajuus on välillä 1 – 3 MHz, ja toisessa vaiheessa vaimennuksen suurin arvo on noin 48 dB. Muissa mitatuissa kuristimissa vaimennus on suurimmillaan vain noin 17 dB eli yli 20 desibeliä pienempi kuin lisämaadoituksella varustetussa kuristimessa. Mitattavassa jännitteessä dekadin ero tarkoittaa 20 desibeliä eli kuristimen aiheuttama suurtaajuisten signaalien jännitteen vaimentuminen on kymmenkertainen eron ollessa 20 dB. Johtuvien häiriöiden vaimentamisessa maadoitetulla foliokerroksella varustetulla kuristimella saavutetaan siis hyötyä.

Impedanssikäyrä saavuttaa lakipisteensä resonanssitaajuudella  $f_0$ , jolloin hajakapasitanssin vaikutus kumoaa induktanssin taajuuden kasvaessa impedanssia suurentavan vaikutuksen. Resonanssitaajuutta suuremmilla taajuuksilla kuristin käyttäytyy siis yhä enemmän kondensaattorin tavoin kuvan 3.3 mukaisesti. Foliokuristimien ominaisresonanssitaajuus on pienempi kuin muotokuparilla käämityn kuristimen, mikä johtuu foliokuristimen suuremmasta hajakapasitanssista. Vertaamalla kuvaan 3.6 nähdään, että 0,11 mH ja 0,115 mH foliokuristinten väliinkytkemisvaimennus noudattelee likimain 0,1 mH induktanssin ja 100 pF kapasitanssin väliinkytkemisvaimennuskäyriä sekä suuruudeltaan että resonanssitaajuudeltaan.

Kuvassa 4.14 nähdään oskilloskoopin ruudulta otettu esimerkkikuva jännitesignaalin vaimennusmittauksesta. Keltainen käyrä on kuristimeen syötettävää amplitudiltaan viisi voltia olevaa signaalia ja sininen käyrä on mitattu kuristimen toiselta puolelta 50  $\Omega$  vastuksen yli. Kuvasta näkee, että signaali vaimentuu ja lisäksi siihen aiheutuu vaihesiirtoa verrattuna signaaligeneraattorin ulostulosta mitattuun jännitteeseen.

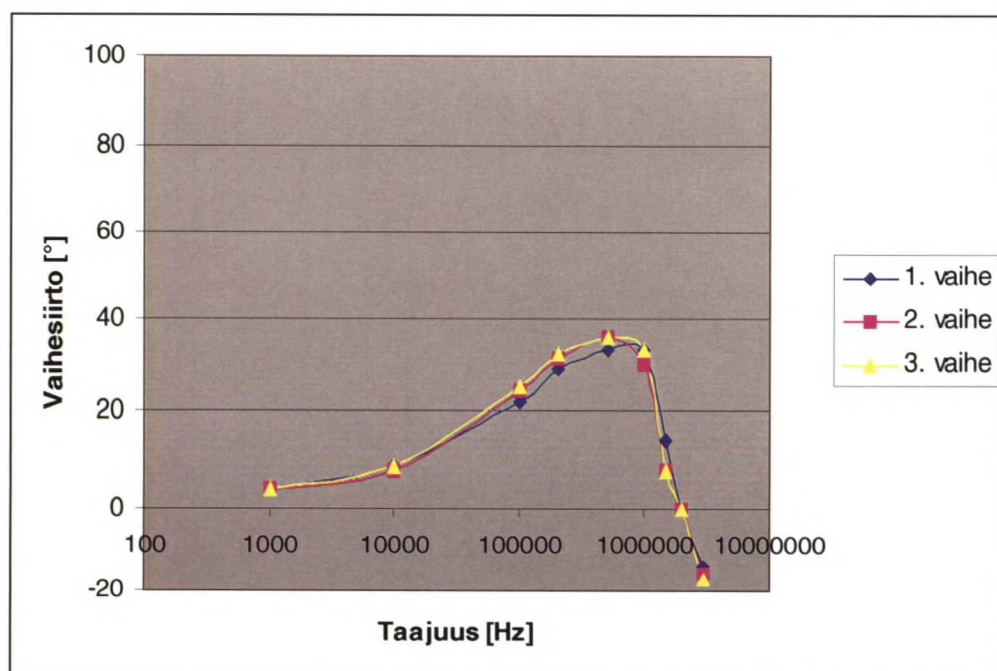




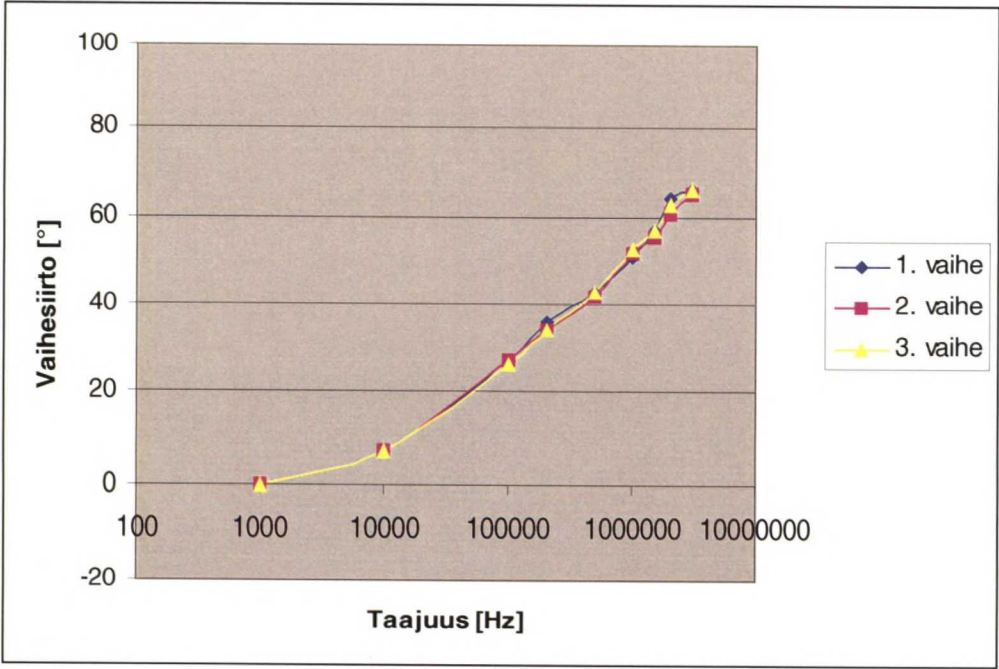
Kuva 4.14. Väliinkytkemiskertoimen mittaus kuvattuna oskilloskoopin ruudulta.

#### 4.4.4 Vaihevaste

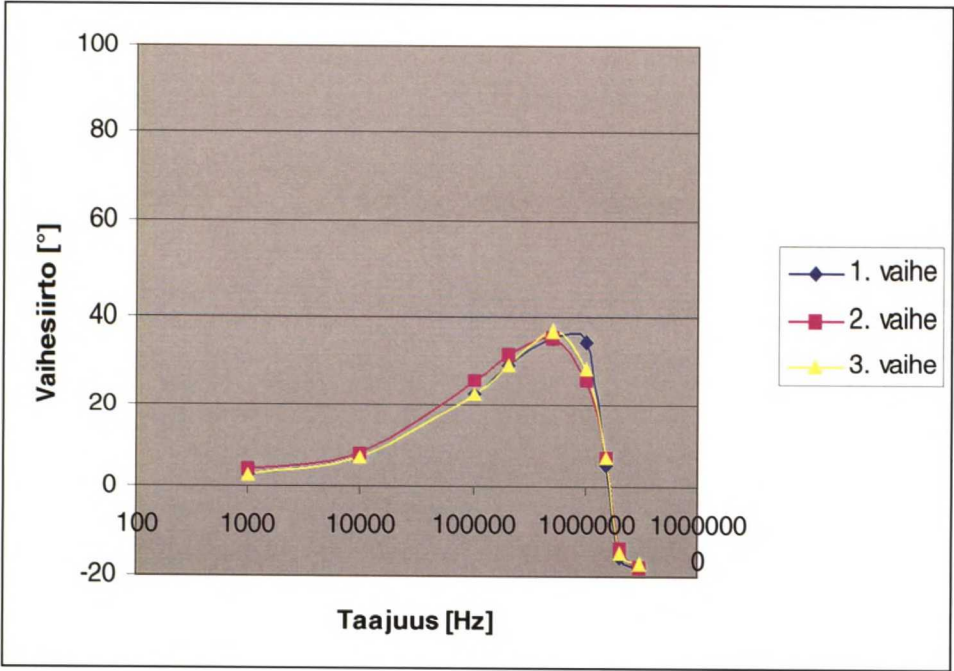
Väliinkytkemiskerrointa mitattaessa saadaan samalla mitattua mittaussignaaliin aiheutuva vaihesiirto. Kuvissa 4.15-4.18 on esitetty kuristimien vaihevaste eli vaihesiirto taajuuden funktiona kappaleessa 4.3 esitetyn mittauskytkennän mukaisesti mitattuna.



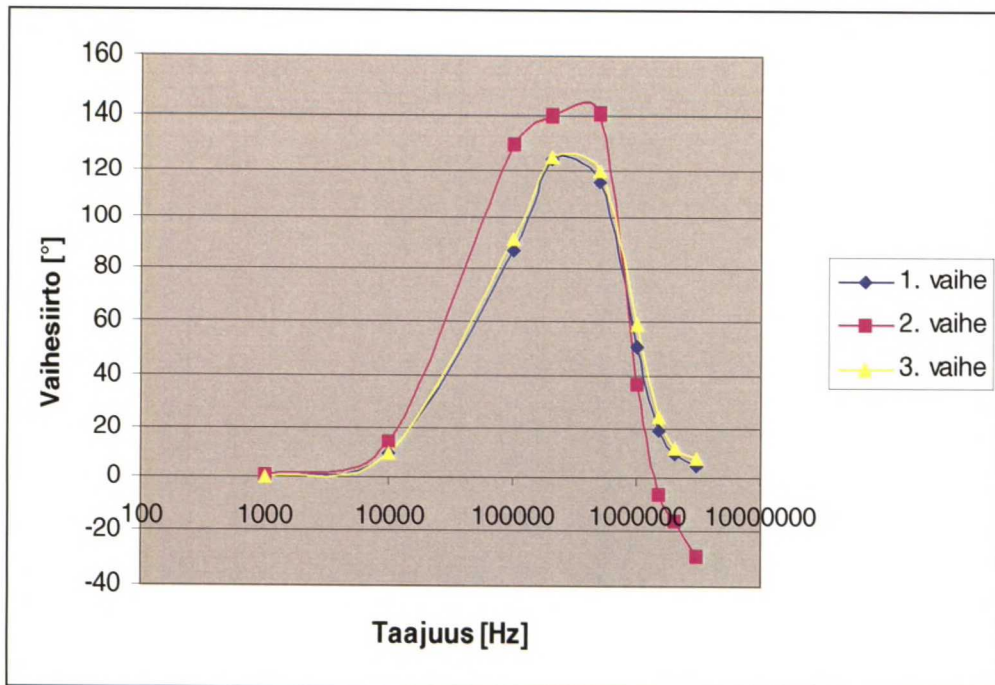
Kuva 4.15. 0,115 mH foliokuristimen vaihevaste.



Kuva 4.16. 0,115 mH muotokuparikäämityn kuristimen vaihevaste.



Kuva 4.17. 0,11 mH foliokuristimen vaihevaste.



Kuva 4.18. 0,11 mH lisämaadoituksellisen foliokuristimen vaihevaste.

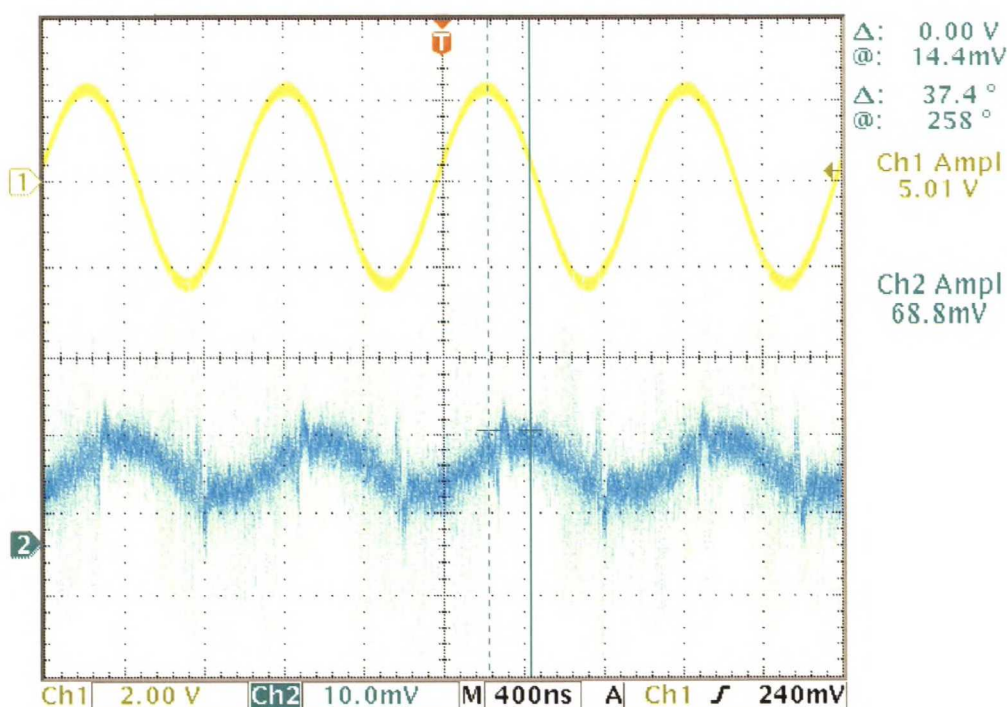
Kuten edellä jo väliinkytkemisvaimennusmittauksissa huomattiin, käyttäytyy muotokuparikäämitty kuristin pienemmästä hajakapasitanssista johtuen suurilla taajuuksilla erilailla kuin foliokuristimet. Mittauksissa käytetyllä suurimmalla eli kolmen megahertsin taajuudella muotokuparikäämityn kuristimen impedanssi on edelleen selkeästi induktiivinen, kun taas foliokuristimissa vaihesiirto on jo siirtynyt negatiiviseksi lukuunottamatta 0,11 mH lisämaadoituksellisen foliokuristimen ensimmäistä ja kolmatta vaihetta. Tämä tarkoittaa samalla, että muotokuparikäämityn kuristimen impedanssi on induktiivinen vielä kolmen megahertsin taajuudellakin mitattaessa 50 ohmin vastuksen yli. Sen sijaan foliokuristinten impedanssi on mainittua kahta poikkeustapausta lukuunottamatta jo kapasitiivinen eli hajakapasitanssin vaikutus impedanssiin aiheuttaa kuristimen alkavan toimia yhä enemmän kondensaattorin tavoin.

#### 4.4.5 Mittauskytkennän häiriöt

Suurimmilla taajuuksilla ongelmaksi mittauksessa muodostuivat jännitekoettiin kytkeytyvät säteilevät häiriöt. Osa niistä aiheutui itse mittauskytkennän johtimien ja kuristimen virran lähikentästä ja kuristimen hajakentästä, osa oli mittausympäristössä muuten esiintyviä suurtaajuisia häiriöitä. Itse mittauskytkennän ja kuristimen lähikenttähäiriö oli vaikeampi erottaa todellisesta signaalista kuin muut häiriöt, koska kytkeytyvän häiriön taajuus oli sama kuin mitattavan kuristimen läpi kulkevan signaalin. Sen sijaan ympäristön muut häiriökentät olivat enimmäkseen selvästi suurtaajuisempia ja aiheuttivat selkeitä jännitepiikkejä mitattavaan sinimuotoiseen signaaliin, jonka taajuus tunnetaan. Oskilloskooppikuvasta katsomalla pystyttiin erottamaan suurtaajuinen kohina helposti ja jättämään se huomioimatta kun tarkastellaan vain tietyn taajuisen signaalin amplitudia.



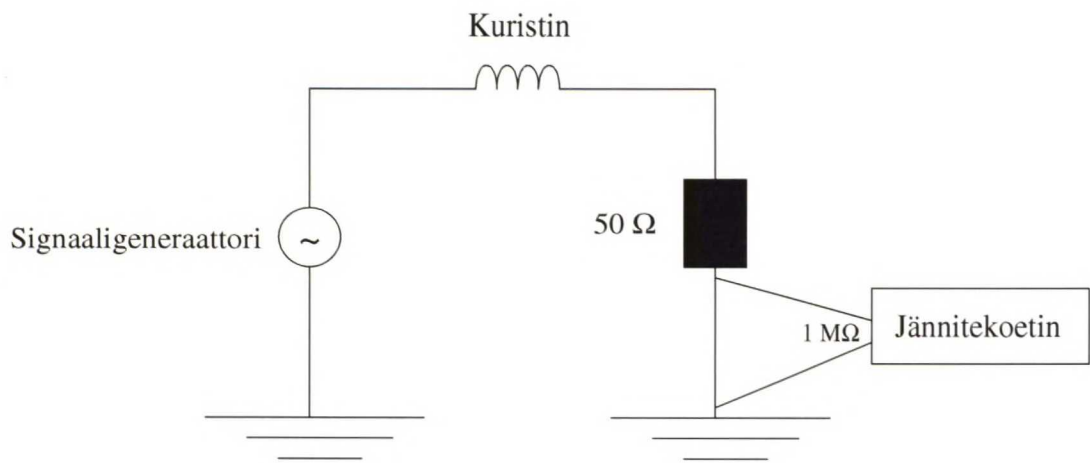
Kuva 4.19 havainnollistaa tilannetta. Sinimuotoisen signaalin amplitudi pystytään erottamaan kuvasta melko helposti, vaikka kuvassa on erittäin paljon häiriötä. Oskilloskoopin amplitudimittaus näyttää sen sijaan häiriöiden takia amplitudin liian suureksi. Oskilloskoopin näyttämä on 68,8 mV, kun kuvasta lukemalla (sinisellä piirretty signaali on 10 mV / ruutu) sinimuotoisen signaalin amplitudi on vain noin 10 millivoltia. Oskilloskoopista oli kytketty päälle alipäästösuodatus, joka suodattaa signaalista yli 20 megahertsin taajuiset komponentit. Ilman suodatusta suurtaajuinen kohina olisi ollut vieläkin häiritsevempi mittauksessa.



Kuva 4.19. Suurtaajuisen häiriön esiintyminen mitattavassa jännitesignaaliin.

Varsinaisen mittauskytkennän lähikentän muodostamat häiriöt aiheuttivat 500 kHz - 3 MHz mittausalueella suurimmillaan noin 30 millivoltin häiriöjännitteen mitattavaan signaaliin. Tämä vastaa 5 voltin testisignaaliin suhteutettuna -44,4 dB tasoa. Kytkeytymistä voitiin rajoittaa jännitekoettimen asennon muuttamisella ja mittausjohtimien muodostaman silmukan tekemisellä mahdollisimman pieneksi. Häiriön vaikutusta ei pystytty kuitenkaan kokonaan poistamaan. Silmukan muodostaman poikkipinta-alan pienentyessä koettiin kytkeytyvä häiriöjännite pienenee yhtälöiden (3-5) ja (3-6) mukaisesti.

Häiriöiden kytkeytyminen todettiin kuvan 4.20 mukaisella kytkennällä, jossa jännitekoettimen molemmat päät olivat kytkettyinä maapotentiaalissa olevaan johtimeen, mutta silti saatiin mitattua enimmillään noin 30 millivoltin jännitesignaali. Tämä oli havaittavissa ainoastaan suurilla taajuuksilla eli esimerkiksi kilohertsin taajuudella samaa ilmiötä ei esiintynyt. Ilmiö aiheutuu jännitekoettimen johtimien muodostamasta silmukasta, johon kytkeytyy sitä suurempi häiriöjännite, mitä suurempi on virran muutosnopeus (taajuus) yhtälön (3-6) mukaisesti. Mittausjohtimet muodostavat vastaavanlaisen silmukan kuin kuvassa 3.1.



Kuvat 4.20. Mittauskytkentä tarkasteltaessa säteilevän häiriön kytkeytymistä jännitteen mittauksessa.

Säteilemällä kytkeytyvä 30 millivoltin häiriöjännite ei ollut merkittävä verrattuna kuristimen läpi kulkevaan signaaliin muilla kuristimilla paitsi lisämaadoituksella varustetulla 0,11 mH kuristimella. Tämä johtuu siitä, että kyseinen kuristin vaimensi kuristimen läpi kulkevaa signaalia niin paljon, että säteilemällä kytkeytyvä pienikin jännite muodostui merkittäväksi suhteessa johtumalla kulkevan virran aiheuttamaan jännitteeseen. Tämän vuoksi kyseisellä kuristimella saadut mittaustulokset eivät ole tarkkuudeltaan vertailukelpoisia muiden kuristimien kanssa, kun mitataan suurempia kuin 500 kilohertsin taajuuksia. Tulosten epätarkkuus vaikuttaa kuitenkin tämän kuristimen osalta vaimennuksen osalta enimmäkseen huonompaan eli vaimennusta pienentävään suuntaan, koska osa mitattavasta signaalista on mittaussiiriin kytkeytyvää jännitettä eikä pelkästään kuristimen läpi johtuen kulkevaa signaalia. Täten voidaan sanoa, että todellinen lisämaadoituksella varustetun kuristimen väliinkytkemiskerroin on vähintään yhtä suuri tai suurempi kuin mitattu.

Kuvan 4.13 käyrämuodoista näkyy, että lisämaadoituksella varustetun foliokuristimen mittauksissa on luultavasti jonkun verran virhettä. Yli megahertsin taajuuksien mittaustulokset ovat todennäköisesti mittauserätarkkuuksien ja mittauksessa esiintyvien häiriöiden vuoksi hieman virheellisiä kolmannen vaiheen mittauksen osalta. Mittausten mukaan väliinkytkemiskerroin laskee megahertsin taajuuden yläpuolella, mutta kasvaakin sitten taas kolmen megahertsin mittaustaajuudella. Näin ei pitäisi tapahtua, vaan kuristimen ominaisresonanssitaajuutta pienemmillä taajuuksilla väliinkytkemiskertoimen pitäisi kasvaa ja kääntyä laskuun, kun ominaisresonanssitaajuus on ylitetty.

#### 4.4.6 Johtuvat häiriöt

Liitteessä D ovat mittaustulokset johtuvien häiriöiden mittauksista standardin EN 55022 mukaisesti mitattuna taajuuskaistalla 0,15 – 30 MHz. Jännitteen arvot on mitattu standardin mukaisesti desibelimikrovoltteina näennäishuippuarvona ja keskiarvona. Varsinaiset standardin määräämällä sekunnin mittausajalla mitatut arvot on



merkitty  $x$  (näennäishuippuarvo) ja  $+$  merkeillä (keskiarvo). Taulukossa 2.2 esitelty standardin 61800-3 mukaiset raja-arvot on lisäksi merkitty kuviin. Mittauksissa käytettiin ABB ACS800-04-170-5 taajuusmuuttajaa, jonka nimellisteho on 170 kVA ja käyttöjännite 500 voltia. Taajuusmuuttaja ei ollut varustettu EMC-suodatuksella.

Kuvista nähdään, että lyhyemmällä mittausajalla tehty alustava skannaus eli yhtenäisellä viivalla piirretty käyrä tuottaa keskiarvon suhteen tarkkoja tuloksia eli kuristimien keskiarvokäyriä voidaan vertailla, vaikka viralliset lopulliset mittaus-tulokset ovatkin  $+$  merkillä merkityt rastit (keskiarvon osalta). Yhtenäisten käyrien vertaileminen on helpompaa kuin yksittäisten rastien, jotka asettuvat lisäksi mitattavasta laitteesta tai tässä tapauksessa kuristimesta riippuen hieman satunnaisille taajuuksille eivätkä eri kuristimilla täsmälleen samoihin kohtiin. Näennäishuippuarvomittaus antaa sen sijaan erilaisia tuloksia kuin alustavassa taajuuspyyhkäisyssä käytetty huippuarvoilmaisoin lyhyellä mittausajalla. Koko 0,15 - 30 MHz taajuusalueen läpikäyminen näennäishuippuarvoilmaisimella kestäisi huomattavasti kauemmin, koska mittaus perustuu tietynsuuruisen varauksen lataamiseen tietyssä ajassa. Käytännön mittauksissa sitävastoin selvitetään ensin suurimmat häiriötaajuudet huippuarvoa mittaamalla ja sitten mitataan lopullinen tulos ainoastaan yksittäisillä taajuuksilla näennäishuippuarvoina. Myös johtuvien häiriöiden mittauksia koskevissa standardeissa sallitaan vastaava menetelmä.

Kuvissa 4.21-4.23 tavallisen 0,11 mH foliokuristimen ja lisämaadoituksellisen 0,11 mH foliokuristimen mittausten jännitteen keskiarvojen käyrät ovat liitettynä samaan kuvaan. Tavallisen kuristimen käyrä on piirretty mustalla värillä ja lisämaadoituksellisen kuristimen käyrä on sinisellä. Kuvat on rajattu siten, että pystytään tarkastelemaan erityisesti taajuuksia 0,15 – 5 MHz, joten suurimmat taajuudet eivät kunnolla näy kuvissa. Suurilla taajuuksilla (5 – 30 MHz) mitatun taajuusmuuttajan tuottamat häiriöt pienenevät eikä niihin sen vuoksi keskitytty niin tarkasti kuin pienempiin taajuuksiin. Kuviin on lisäksi piirretty punaisella EN 55022 standardin toisen käyttöympäristön (2<sup>nd</sup> environment) laitteiden raja-arvokäyrä.

Maadoituksella varustettua foliokuristinta käytettäessä saadaan vähennettyä taajuusmuuttajan häiriöitä varsinkin taajuuksilla 0,15 – 0,8 MHz sekä 3 – 8 MHz. Näillä taajuuksilla lisämaadoituksella varustetulla kuristimella saavutettava hyöty on 3 - 13 dB. Yli 10 megahertsin taajuuksilla esiintyy kaksi resonanssiipiikkiä, jotka ovat suurempia kuin normaalilla foliokuristimella varustetussa taajuusmuuttajassa.



ABB Industry Oy / Drives  
Mains terminal disturbance voltage

05. Jun 04 15:20

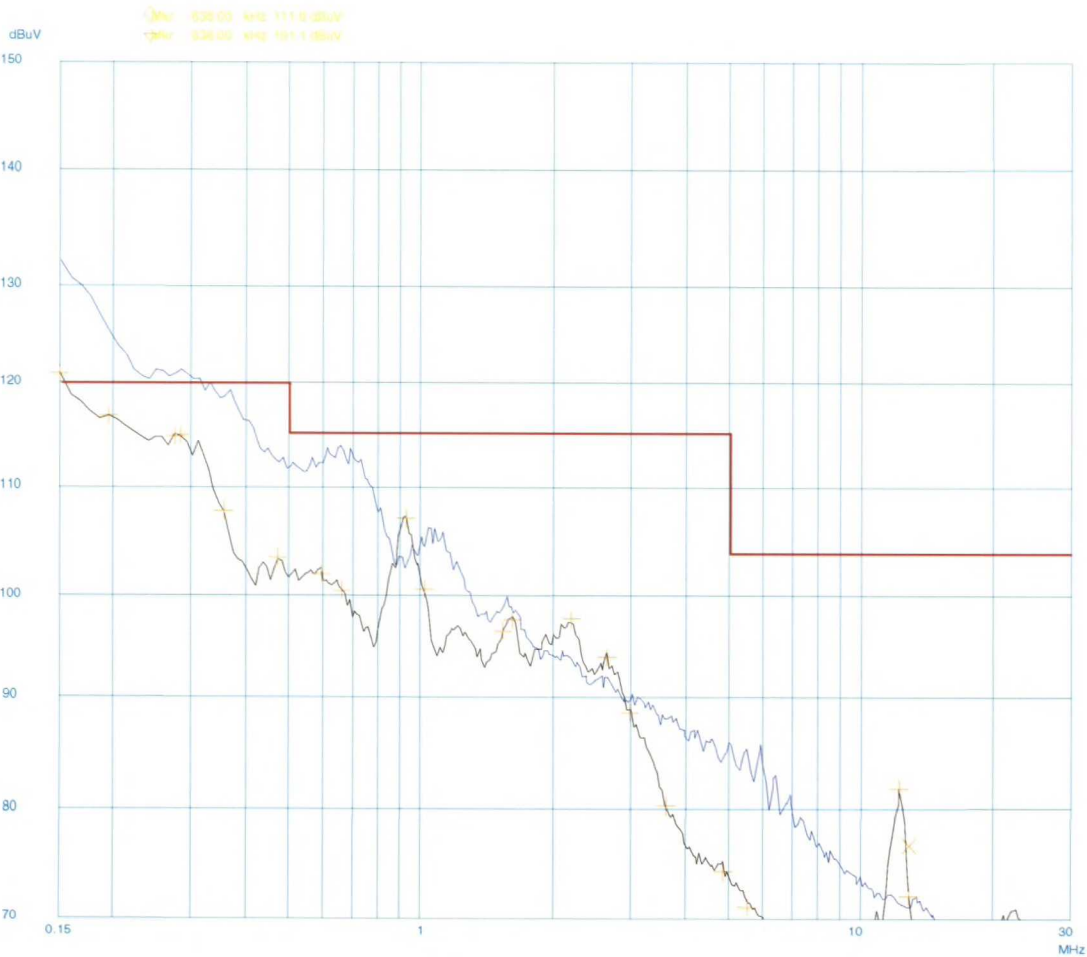
EUT: ACS800-04-0140-5 , 500V supply  
Manuf: ABB Industry Oy  
Op Cond: f<sub>out</sub>=17Hz  
Operator: Klaus Jaukkari  
Test Spec: EN55022 / EN50081-2  
Comment: Motor cable: MCMK 3x70mm<sup>2</sup> +35mm<sup>2</sup> (100m)  
Mains cable: 4x35mm<sup>2</sup>(2m)

Scan Settings (1 Range)

----- Frequencies ----- Receiver Settings -----  
Start Stop Step IF BW Detector M-Time Atten Preamp OpRge  
150k 30M 9k 10k PK+AV 10ms AUTO LN ON 60dB

Final Measurement: x QP / + AV  
Meas Time: 1 s  
Subranges: 25  
Acc Margin: 6dB

Transducer No. Start Stop Name  
1 150k 30M NNB4



Kuva 4.21. 0,11 mH foliokuristinten johtuvat häiriöt 0,15 – 30 MHz 1. vaihe. Tavallisen foliokuristimen käyrä on sinisellä ja lisämaadoituksella varustetun foliokuristimen mustalla. Standardin toisen käyttöympäristön raja-arvo on merkitty punaisella. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]

Myös pienemmillä taajuuksilla on havaittavissa selkeämpiä resonansseja verrattuna normaaliin foliokuristimeen. Esimerkiksi noin 900 kilohertsin taajuudella esiintyy selkeä resonanssi varsinkin ensimmäisessä ja toisessa vaiheessa.

ABB Industry Oy / Drives  
Mains terminal disturbance voltage

05. Jun 04 15:30

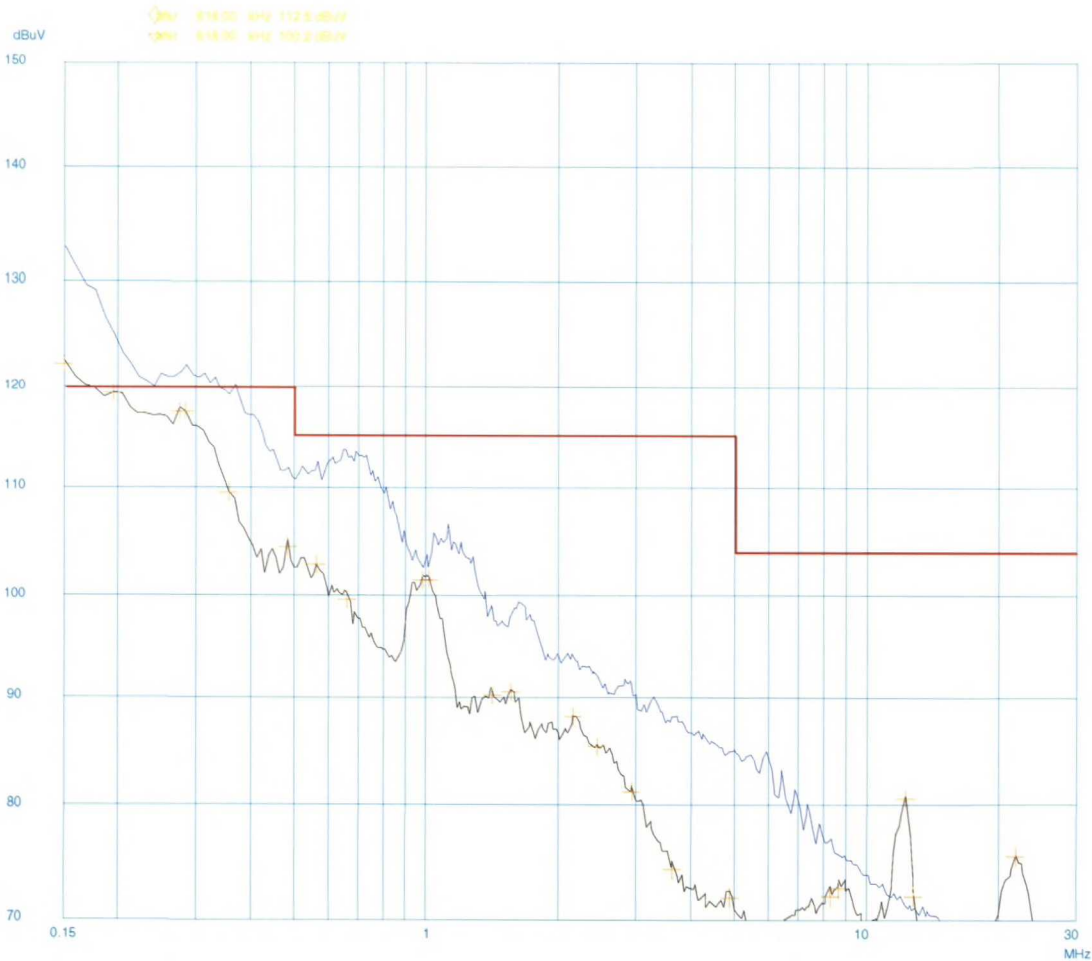
EUT: ACS800-04-0140-5 , 500V supply  
Manuf: ABB Industry Oy  
Op Cond: f<sub>out</sub>=17Hz  
Operator: Klaus Jaukkari  
Test Spec: EN5022 / EN50081-2  
Comment: Motor cable: MCMK 3x70mm<sup>2</sup> +35mm<sup>2</sup> (100m)  
Mains cable 4x35mm<sup>2</sup>(2m)

Scan Settings (1 Range)

----- Frequencies ----- Receiver Settings -----  
Start Stop Step IF BW Detector M-Time Atten Preamp OpRge  
150k 30M 9k 10k PK+AV 10ms AUTO LN ON 60dB

Final Measurement: x QP / + AV  
Meas Time: 1 s  
Subranges: 25  
Acc Margin: 6dB

Transducer No. Start Stop Name  
1 150k 30M NNB4



Kuva 4.22. 0,11 mH foliokuristinten johtuvat häiriöt 0,15 – 30 MHz 2. vaihe. Tavallisen foliokuristimen käyrä on sinisellä ja lisämaadoituksella varustetun foliokuristimen mustalla. Standardin toisen käyttöympäristön raja-arvo on merkitty punaisella. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]

Lisämaadoituksella varustetussa kuristimessa on mittausten perusteella enemmän vaihekohtaisia eroja kuin tavallisella foliokuristimella. Kyseinen kuristin on käsin tehty prototyyppi, joten sen valmistuksessa on mahdollisesti tullut jonkun verran eroja eri vaiheiden välille.

## ABB Industry Oy / Drives

### Mains terminal disturbance voltage

05. Jun 04 15:48

EUT: ACS800-04-0140-5, 500V supply  
 Manuf: ABB Industry Oy  
 Op Cond: f<sub>out</sub>=17Hz  
 Operator: Klaus Jaukkan  
 Test Spec: EN5022 / EN50081-2  
 Comment: Motor cable: MCMK 3x70mm<sup>2</sup> +35mm<sup>2</sup> (100m)  
 Mains cable: 4x35mm<sup>2</sup>(2m)

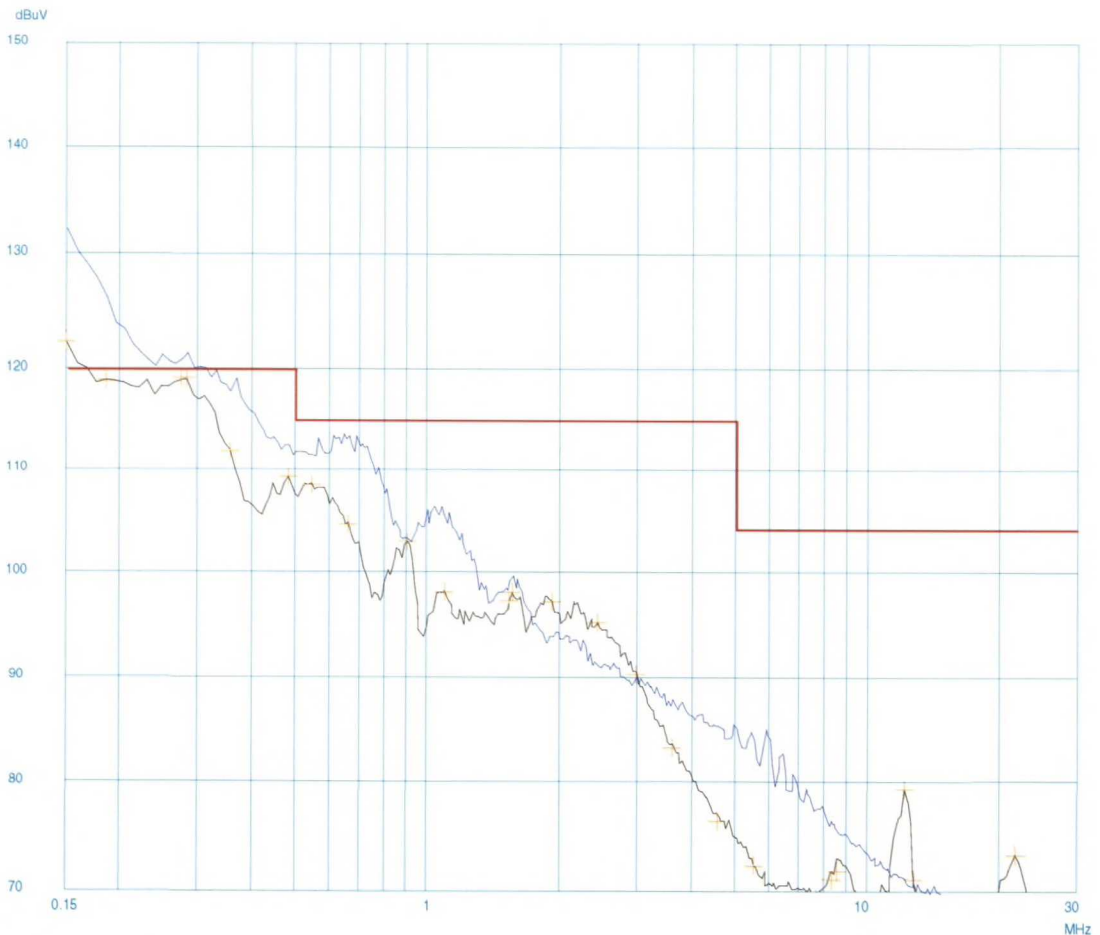
#### Scan Settings (1 Range)

Frequencies			Receiver Settings				
Start	Stop	Step	IF BW	Detector	M-Time	Atten	Preamp OpRge
150k	30M	9k	10k	PK+AV	10ms	AUTO	LN ON 60dB

Final Measurement: x QP / + AV

Meas Time: 1 s  
 Subranges: 25  
 Acc Margin: 6dB

Transducer No.	Start	Stop	Name
1	150k	30M	NNB4



Kuva 4.23. 0,11 mH foliokuristinten johtuvat häiriöt 0,15 – 30 MHz 3. vaihe. Tavallisen foliokuristimen käyrä on sinisellä ja lisämaadoituksella varustetun foliokuristimen mustalla. Standardin toisen käyttöympäristön raja-arvo on merkitty punaisella. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]

Kolmannessa vaiheessa lisämaadoituksella varustetulla foliokuristimella saavutetaan vähiten parannusta suhteessa tavalliseen foliokuristimeen. Tämä saattaa johtua esimerkiksi siitä, että kuristimessa eri vaiheiden lisämaadoituksesta tulee eri matka laitteen maapotentiaaliin ja suojamaajohtimeen. Tällöin impedanssi vaihejohtimista maapotentiaaliin ei ole yhtä suuri kaikissa vaiheissa. Pienetkin erot esimerkiksi maadoitusjohtimien pituuksissa aiheuttavat muutosta impedanssiin suurilla



taajuuksilla hajainduktanssien vuoksi. Tämän lisäksi edellämainitut kuristimen valmistuksessa mahdollisesti syntyneet vaihekohtaiset erot vaikuttavat asiaan.

Johtuvien häiriöiden mittaaminen toimintatilanteessa taajuusmuuttajaan kytkettynä antaa erilaisia tuloksia verrattuna kappaleessa 4.4.3 mitattuun sinimuotoisen jännitesignaalin vaimentumiseen. Tähän syynä on esimerkiksi laitteen erilaiset impedanssit kuristimesta laitteeseen päin. Taajuusmuuttajan tasasuuntaussillan impedanssi ei ole vakio, vaan riippuu tarkasteltavasta ajanhetkestä ovatko diodit johto- vai estotilassa. Jännitesignaalinmittauksissa käytettiin vakiona pysyvää 50 ohmin impedanssia signaaligeneraattorin ulostulossa.

Erilaisten kytketymisreittien kautta käytännön laitteessa häiriö voi lisäksi kulkeutua sähköverkkoon muutakin kautta kuin pääasiallinen teho, joka kulkee kuristimen läpi. Kuristimesta syöttöverkkoon päin johtuvien häiriöiden mittaus suoritetaan samansuuruisen eli 50 ohmin vastuksen yli kuin sinimuotoisen jännitteen vaimenemista koskevissa mittauksissa. Lisäksi standardien EN 55022 ja CISPR 16 mukaisessa mittauksessa käytetty keinoverkko sisältää hieman induktanssia syöttöverkon ja mittauspisteen tai laitteen välillä kuvan 2.8 mukaisesti. Saatujen mittaustulosten eroihin vaikuttaa myös se, että taajuusmuuttajan häiriöt sisältävät sekä yhteis- että eromuotoisia häiriöitä. Sen sijaan foliokuristimen lisämaadoitus vaikuttaa lähinnä yhteismuotoiseen häiriöön, jonka vaimenemista kappaleen 4.3 mukainen mittaus vastaa, koska siinä suurtaajuinen jännitesignaali kytketään yhden vaiheen ja maapotentiaalin välille.

## 5 LOPPUPÄÄTELMÄT

Tämän työn päämääränä oli tutkia kuristimen suurtaajuusominaisuuksia. Työssä käytiin lyhyesti läpi kuristimeen, taajuusmuuttajaan ja johtuviin häiriöihin liittyvää perusteoriaa. Lisäksi tutustuttiin diplomityön aihepiiriä koskeviin matemaattisiin malleihin sekä kuristimelta vaadittaviin yleisiin ominaisuuksiin ja työn aiheena olevien suurtaajuusominaisuuksien erityisvaatimuksiin. Induktanssin lisäksi kuristimen sähköisistä ominaisuuksista hajakapasitanssi on tärkeä erityisesti suurilla taajuuksilla.

Työssä suoritettiin vertailua erilaisten kuristimien välillä mittaamalla pelkkää kuristinta irrallaan ja tarkastelemalla tämän lisäksi suurtaajuusominaisuuksia erityyppisten kuristimien ja taajuusmuuttajan avulla. Tulosten perusteella eri kuristimilla voidaan havaita selkeitä eroja suurilla, erityisesti megahertsien taajuuksilla. Induktanssiltaan samaa luokkaa olevat kuristimet toimivat pieniä eroja lukuunottamatta toisiaan vastaavasti vielä kymmenien kilohertsien taajuuksiin asti.

Diplomityössä tutkittiin neljää eri kolmivaihekuristinta, joista kaksi olivat tavallisia foliokuristimia, yksi oli käämitty muotokuparijohtimella ja yksi teetettiin työtä varten. Viimeksimainittuun foliokuristimeen oli lisätty erillinen maadoitettu foliokerros varsinaisten johdinkerrosten väliin. Tällä rakenteella pyrittiin estämään suurtaajuisien häiriöiden kytkeytymistä kapasitiivisesti kuristimen johdinkierroksesta seuraavaan.

Mittausten perusteella muotokuparilla käämityn kuristimen ominaisresonanssitaajuus on suurempi kuin foliokuristinten, mutta sen väliinkytkemiskerroin on kuitenkin samaa luokkaa tavallisten foliokuristimien kanssa tarkasteltavalla taajuusalueella. Laitteesta erillään mitattuna kuristimista selvästi paras väliinkytkemiskerroin suurilla taajuuksilla saavutettiin foliokuristimella, johon oli lisätty erillinen maadoitettu foliokerros johdinkierrosten väliin. Erot muihin mitattuihin kuristimiin verrattuna olivat noin 20 desibelin luokkaa tarkasteltaessa taajuuksia 500 kHz – 3 MHz. Työssä tutkittiin johtuvia häiriöitä, mutta suurtaajuisilla signaaleilla törmättiin myös säteileviin häiriöihin, jotka aiheutuivat muunmuassa mitattavien kuristinten hajakentästä. Nämä vaikuttivat osaltaan hieman saavutettuihin mittaustuloksiin ja tarkkuuteen. Toisaalta myös kuristinten normaalissa käyttöympäristössä törmätään samaan asiaan tutkittaessa suurtaajuisia signaaleja.

Käytännön toimintaa vastaavassa tilanteessa vertailtiin kahta 0,11 mH kuristinta, jotka oli asennettu taajuusmuuttajaan. Mittaukset tehtiin johtuvien häiriöiden mittausta koskevien standardien mukaisesti. Tässäkin tapauksessa parhaiten laitteen johtuvien häiriöiden tasoa alensi lisämaadoituksella varustettu foliokuristin. Ero tavalliseen foliokuristimeen on suurimmillaan noin 13 desibeliä, mutta ero riippuu tarkasteltavasta taajuudesta. Lisäksi kolmen eri syöttövaiheen välillä on eroja

johtuvien häiriöiden suuruudessa. Absoluuttisina arvoina ja verrattaessa johtuvien häiriöiden standardien raja-arvoihin suurimmat häiriöt mitatussa taajuusmuuttajassa olivat mittausalueen alapäässä eli taajuuksilla 150 kHz – 1 MHz. Näillä taajuuksilla lisämaadoituksella varustettu kuristin pärjasi parhaiten tavalliseen foliokuristimeen verrattuna, joten siitä saavutetaan käytännön hyötyä, kun vaaditaan laitteen täyttävän standardien vaatimukset johtuvien häiriöiden suhteen.

Diplomityössä keskityttiin vertailemaan lähinnä kuristimen käämityksen vaikutusta suurtaajuusominaisuuksiin, joten muita tarkasteltavia asioita jatkotutkimuksiin ovat esimerkiksi kuristinsydämen ja ilmavälin vaikutukset. Erilaisilla sydänmateriaaleilla kuten raudalla, ferriitillä ja amorfisilla materiaaleilla on myös eroja suurilla taajuuksilla. Tässä tarkasteltiin tarkemmin ainoastaan kolmivaiheisia yhteisellä sydämellä varustettuja vaihtovirtakuristimia, joita käytetään kolmivaiheisen taajuusmuuttajan tulokuristimina.



## LÄHDELUETTELO

Bronaugh, E L, 1988, *Electromagnetic Interference Test Methodology and Procedures*, Volume 6, Interference Control Technologies Inc.

CISPR 16, 1999, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods*

EN 55011, 1998 + amendments A1 1999 + A2 2002, *Industrial, Scientific and Medical (ISM) Radio-Frequency Equipment Radio Disturbance Characteristics - Limits and Methods of Measurement*, 39s.

EN 55022, 1998 + amendments A1 2000 + A2 2003, *Information Technology Equipment - Radio Disturbance Characteristics - Limits and Methods of Measurement*, 50s.

EN 61800-3, 1996 + amendment A11 2000, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC product standard including specific test methods, first edition*

Lindell, I, Sihvola, A, 1995, *Sähkömagneettinen kenttäteoria*, 1. Staattiset kentät, Otatiето OY, Tampere, 225 s.

McLyman, C, 1997, *Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors*, Marcel Dekker Inc, 630s.

Mohan, N, Undeland, T, Robbins, W, 1995, *Power Electronics*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., 802 s.

Niiranen, J, 1997, *Tehoelektroniikan komponentit*, Otatiето OY, Helsinki, 354s.

Sepponen, R, 2001, *EMC periaatteet ja käytäntö*, Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratorion kurssin S-66.202 Elektroniikkatuotteen suunnittelu II luentomateriaali.

Sihvola, A, Lindell, I, 1996, *Sähkömagneettinen kenttäteoria*, 2. Dynaamiset kentät, Otatiето OY, Tampere, 200 s.

Silventoinen, P, 2001, *Electromagnetic Compatibility and EMC-Measurements in DC-Voltage Link Converters*, Digipaino, Lappeenranta, 115s.

Snelling, E, 1969, *Soft Ferrites, Properties and Applications*, Iliffe Books Ltd., London, 390 s.

Snelling, E, Giles, A D, 1983, *Ferrites for Inductors and Transformers*, Research Studies Press Ltd., 167s.

Tellinen, J, 1999, *Magneettisten komponenttien EMC-mallintaminen*, Raportti nro 57, Teknillinen Korkeakoulu/Sähkömekaniikan laboratorio, Espoo, 50s.

Tihanyi, L, 1995, *Electromagnetic Compatibility in Power Electronics*, J.K.Eckert & Company, Inc., 403 s.

Yli-Juuti, J, marraskuussa 2003 keskustelut diplomityön aiheen lähtötiedoista ja tavoitteista diplomityön ohjaajan kanssa.

LIITE A INDUKTANSSIMITTAUKSEN TULOKSET

1. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	128	128	125,0
delta t2	400	39	256	128	121,9
delta t3	400	37	376	120	123,3
delta t4	400	35	504	128	109,4
delta t5	400	33	680	176	75,0

2. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	128	128	125,0
delta t2	400	39	252	124	125,8
delta t3	400	37	376	124	119,4
delta t4	400	35	504	128	109,4
delta t5	400	33,5	652	148	90,5

3. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	128	128	125,0
delta t2	400	39	256	128	121,9
delta t3	400	37	380	124	119,4
delta t4	400	35	504	124	112,9
delta t5	400	33	680	176	75,0

Liite A1. 0,115 mH foliokuristimen induktanssimittauksen tulokset.

1. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	128	128	125,0
delta t2	400	39	256	128	121,9
delta t3	400	37	380	124	119,4
delta t4	400	35	508	128	109,4
delta t5	400	33,5	688	180	74,4

2. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	128	128	125,0
delta t2	400	39	256	128	121,9
delta t3	400	37	376	120	123,3
delta t4	400	35	500	124	112,9
delta t5	400	33,5	656	156	85,9

3. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	39,5	128	128	123,4
delta t2	400	39	256	128	121,9
delta t3	400	37	380	124	119,4
delta t4	400	35	516	136	102,9
delta t5	400	33	704	188	70,2

Liite A2. 0,115 mH muotokuparikäämityn kuristimen induktanssimittauksen tulokset.



1. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	132	132	121,2
delta t2	400	39	264	132	118,2
delta t3	400	37	396	132	112,1
delta t4	400	33	580	184	71,7

2. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	132	132	121,2
delta t2	400	38,5	264	132	116,7
delta t3	400	37	400	136	108,8
delta t4	400	33,5	576	176	76,1

3. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	132	132	121,2
delta t2	400	39	264	132	118,2
delta t3	400	37	400	136	108,8
delta t4	400	34	600	200	68,0

Liite A3. 0,11 mH foliokuristimen induktanssimittauksen tulokset.

1. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	132	132	121,2
delta t2	400	39	264	132	118,2
delta t3	400	37	400	136	108,8
delta t4	400	33	584	184	71,7

2. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	136	136	117,6
delta t2	400	39	272	136	114,7
delta t3	400	37	412	140	105,7
delta t4	400	33,5	584	172	77,9

3. vaihe					$L=U \cdot dt/di$
	t (us)	$U_{ave}$ [V]	I (A)	delta I (A)	L (uH)
delta t1	400	40	140	140	114,3
delta t2	400	39	280	140	111,4
delta t3	400	37	428	148	100,0
delta t4	400	33,5	620	192	69,8

Liite A4. 0,11 mH lisämaadoituksellisen foliokuristimen induktanssimittauksen tulokset.

LIITE B IMPEDANSSIMITTAUKSEN TULOKSET

1. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [Ω]	0,00285	0,054	0,52	4,7	8,66	32,01
φ [°]	0	84,9	87,1	80,4	76,8	67,2
2. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [Ω]	0,00313	0,056	0,534	4,92	9,21	35,79
φ [°]	0	84,5	87,3	82	78,8	68,4
3. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [Ω]	0,00289	0,055	0,527	4,76	8,76	32,25
φ [°]	0	84,5	87,1	80,2	76,6	66,4

Liite B1. 0,115 mH foliokuristimen impedanssimittauksen tulokset HP 4274A LCR-mittarilla mitattuina.

1. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [Ω]	0,00253	0,056	0,536	4,86	8,98	33,09
φ [°]	0	85,4	87,3	80,7	77,3	67,9
2. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [Ω]	0,00251	0,056	0,543	5,01	9,43	36,67
φ [°]	0	85,4	87,6	82,4	79,4	69,2
3. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [Ω]	0,00244	0,055	0,531	4,8	8,86	32,63
φ [°]	0	85,3	87,2	80,5	77	67

Liite B2. 0,115 mH muotokuparikäämityn kuristimen impedanssimittauksen tulokset HP 4274A LCR-mittarilla mitattuina.

1. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [Ω]	0,00249	0,051	0,491	4,39	7,99	28,54
φ [°]	0	85	86,9	79,3	75,5	65,6
2. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [Ω]	0,00247	0,052	0,496	4,56	8,51	32,57
φ [°]	0	85	87,3	81,5	78,2	67,3
3. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [Ω]	0,00252	0,051	0,484	4,32	7,88	28,3
φ [°]	0	85	86,9	79,2	75,2	64,7

Liite B3. 0,11 mH foliokuristimen impedanssimittauksen tulokset HP 4274A LCR-mittarilla mitattuina.

1. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [ $\Omega$ ]	0,00267	0,05	0,476	4,27	7,76	27,3
$\varphi$ [°]	0	84,5	86,8	79,2	75,2	65,5
2. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [ $\Omega$ ]	0,00258	0,049	0,469	4,34	8,07	30,1
$\varphi$ [°]	0	84,6	87,3	81,5	77,6	67,4
3. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [ $\Omega$ ]	0,00264	0,048	0,453	4,11	7,48	26,4
$\varphi$ [°]	0	84,5	87	79,6	75,4	66,5

Liite B4. 0,11 mH lisämaadoituksellisen foliokuristimen impedanssimittauksen tulokset HP 4274A LCR-mittarilla mitattuina.

1. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [ $\Omega$ ]	0,00285	0,054	0,516	4,67	8,59	31,75
$\varphi$ [°]	0	86,1	87,3	80,4	76,8	67,1
2. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [ $\Omega$ ]	0,00313	0,056	0,531	4,89	9,16	35,63
$\varphi$ [°]	0	86,3	87,6	82,1	78,8	68,7
3. vaihe						
f [Hz]	0	100	1000	10000	20000	100000
Z [ $\Omega$ ]	0,00289	0,055	0,523	4,73	8,69	31,99
$\varphi$ [°]	0	86,1	87,3	80,3	76,7	67

Liite B5. 0,115 mH foliokuristimen impedanssimittauksen tulokset Philips PM6304 LCR-mittarilla mitattuina.



LIITE C VÄLIINKYTKEMISKERROINMITTAUKSEN TULOKSET

1. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	4,96	4,48	3,56	2,76	1,86	1,13	0,83	0,75	1,12
U [dB]	0,07	0,95	2,95	5,16	8,59	12,92	15,60	16,48	13,00
φ [°]	4	9	22	29	33	33	14	0	-14
2. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	4,92	4,6	3,34	2,58	1,6	1,03	0,92	0,87	1,14
U [dB]	0,14	0,72	3,50	5,75	9,90	13,72	14,70	15,19	12,84
φ [°]	4	8	24	31	36	30	8	0	-16
3. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	4,92	4,72	3,68	3	1,76	1,15	0,84	0,75	1,13
U [dB]	0,14	0,50	2,66	4,44	9,07	12,77	15,49	16,48	12,92
φ [°]	4	9	25	32	36	33	8	0	-17

Liite C1. 0,115 mH foliokuristimen väliinkytkemiskerroinmittauksen tulokset.

1. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	5	4,88	3,68	3,04	2,04	1,42	1,15	0,99	0,77
U [dB]	0,00	0,21	2,66	4,32	7,79	10,93	12,77	14,07	16,25
φ [°]	0	7	27	36	43	51	57	64	66
2. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	5	4,88	3,46	2,72	1,87	1,37	1,14	0,95	0,77
U [dB]	0,00	0,21	3,20	5,29	8,54	11,24	12,84	14,42	16,25
φ [°]	0	7	27	34	42	52	54	56	65
3. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	5	4,92	3,68	2,9	2,06	1,5	1,14	0,98	0,79
U [dB]	0,00	0,14	2,66	4,73	7,70	10,46	12,84	14,15	16,03
φ [°]	0	7	26	34	43	53	57	63	66

Liite C2. 0,115 mH muotokuparikäämityn kuristimen väliinkytkemiskerroinmittauksen tulokset.

1. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	4,96	4,84	3,8	3,12	2	1,19	0,83	0,81	1,68
U [dB]	0,07	0,28	2,38	4,10	7,96	12,47	15,60	15,81	9,47
φ [°]	3	7	23	30	36	35	5	-16	-18
2. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	4,96	4,84	3,5	2,63	1,71	1,13	0,98	0,77	1,6
U [dB]	0,07	0,28	3,10	5,58	9,32	12,92	14,15	16,25	9,90
φ [°]	4	8	26	32	36	26	7	-14	-18
3. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	4,96	4,88	3,8	2,96	2,02	1,14	0,78	0,83	1,69
U [dB]	0,07	0,21	2,38	4,55	7,87	12,84	16,14	15,60	9,42
φ [°]	3	7	23	30	37	29	7	-15	-17

Liite C3. 0,11 mH foliokuristimen väliinkytkemiskerroinmittauksen tulokset.

1. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	5	4,96	4,4	1,58	0,31	0,1	0,07	0,06	0,055
U [dB]	0,00	0,07	1,11	10,01	24,15	33,98	37,08	38,42	39,17
φ [°]	0	5	87	124	115	51	19	10	5
2. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	5	4,96	2,16	0,57	0,09	0,022	0,02	0,022	0,031
U [dB]	0,00	0,07	7,29	18,86	34,89	47,13	47,96	47,13	44,15
φ [°]	1	8	130	140	141	37	-6	-16	-29
3. vaihe									
f [Hz]	1000	10000	100000	200000	500000	1000000	1500000	2000000	3000000
U [V]	5	4,96	4,2	1,14	0,19	0,07	0,07	0,07	0,06
U [dB]	0,00	0,07	1,51	12,84	28,40	37,08	37,08	37,08	38,42
φ [°]	0	5	92	125	120	59	24	12	8

Liite C4. 0,11 mH lisämaadoituksellisen foliokuristimen väliinkytkemiskerroinmittauksen tulokset.

LIITE D JOHTUVIEN HÄIRIÖIDEN MITTAUSTULOKSET

ABB Industry Oy / Drives  
Mains terminal disturbance

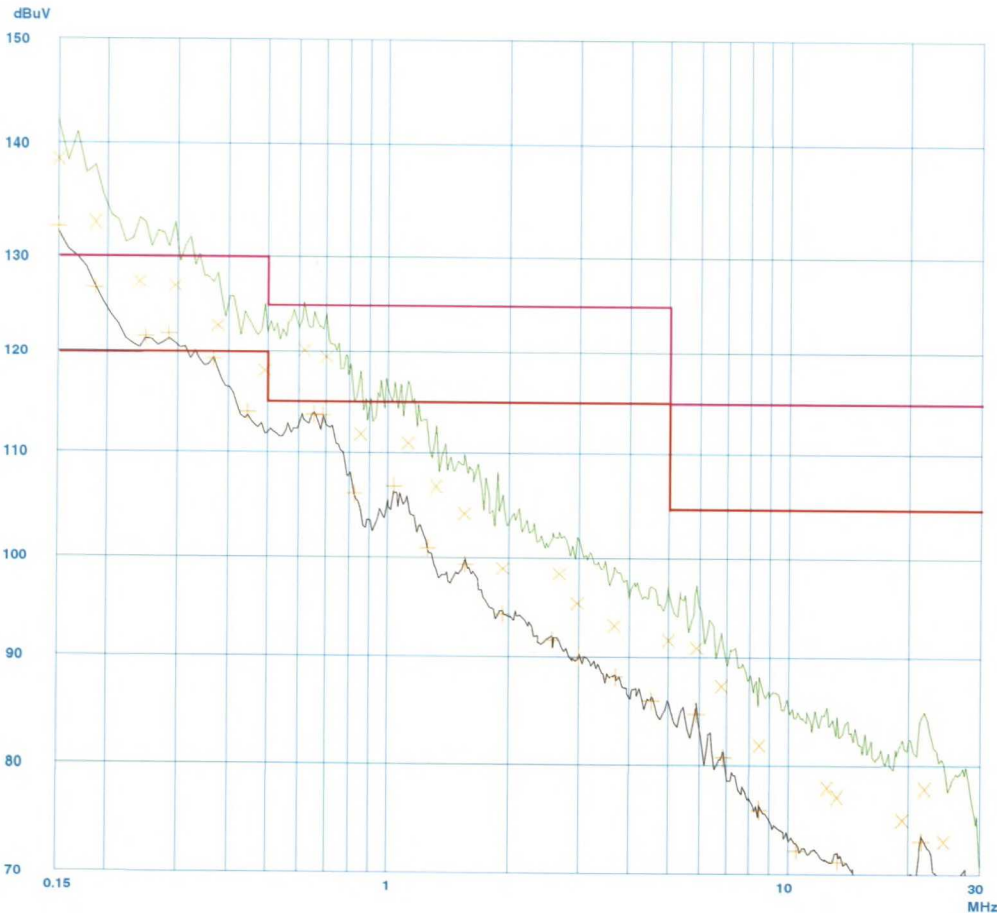
05. Jun 04 13:01

EUT: ACS800-04-0170-5 , 500V supply  
Manuf: ABB Industry Oy  
Op Cond: f<sub>out</sub>±17Hz  
Operator: Klaus Jaukkari  
Test Spec: EN55022 / EN50081-2  
Comment: Motor cable: MCMK 3 x 16 mm2 + 16 mm2 (100m)  
Mains cable: 4 x 16 mm2 (2m)

Scan Settings (1 Range)				Receiver Settings			
Frequencies							
Start	Stop	Step	IF BW	Detector	M-Time	Atten	Preamp OpRge
150k	30M	9k	10k	PK+AV	10ms	AUTO	LN ON 60dB

Final Measurement: x QP / + AV  
Meas Time: 1 s  
Subranges: 25  
Acc Margin: 6dB

Transducer No. Start Stop Name  
1 150k 30M NNB4



Liite D1 0,11 mH foliokuristimen johtuvien häiriöiden näennäishuippuarvo- ja keskiarvokäyrät taajuuden funktiona 1. vaihe. Standardin toisen käyttöympäristön raja-arvot ovat merkittyjä punaisella ja violetilla. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]



ABB Industry Oy / Drives  
Mains terminal disturbance

05. Jun 04 13:12

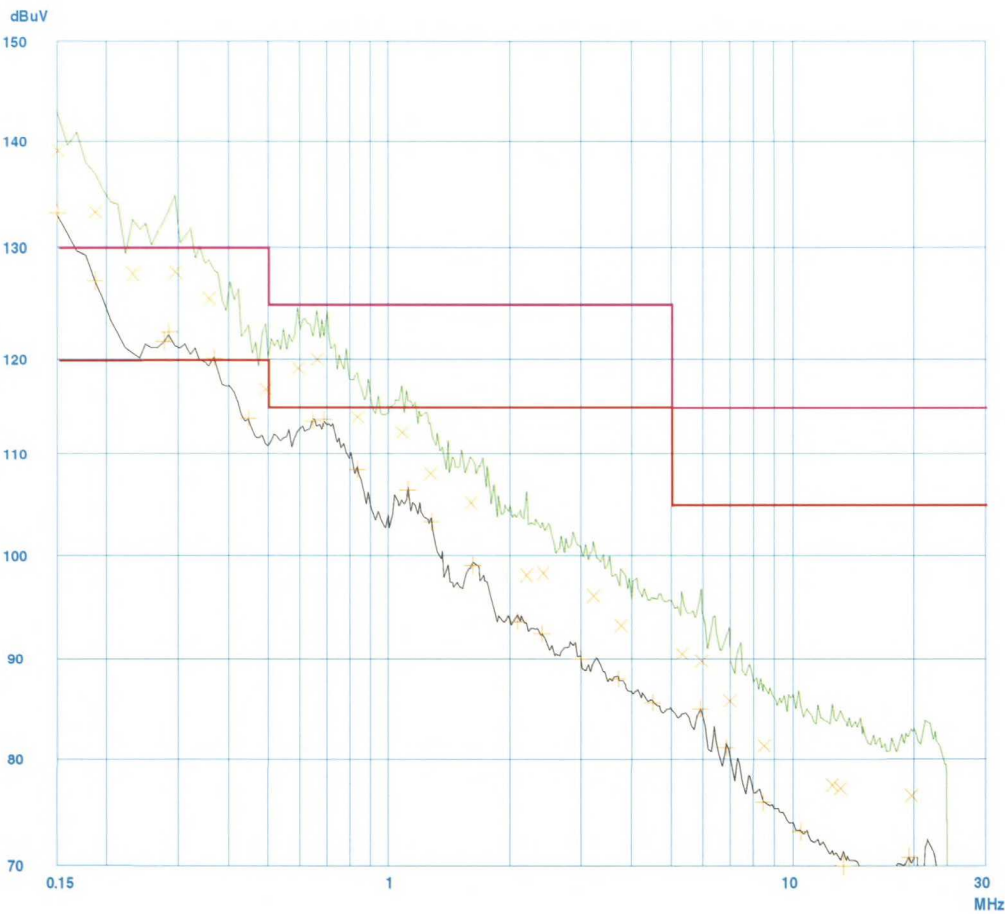
EUT: ACS800-04-0170-5 , 500V supply  
Manuf: ABB Industry Oy  
Op Cond: fouts=17Hz  
Operator: Klaus Jaukkari  
Test Spec: EN55022 / EN50081-2  
Comment: Motor cable: MCMK 3 x 16 mm2 + 16 mm2 (100m)  
Mains cable: 4 x 16 mm2 (2m)

Scan Settings (1 Range)

----- Frequencies -----|----- Receiver Settings -----|  
Start Stop Step IF BW Detector M-Time Atten Preamp OpRge  
150k 30M 9k 10k PK+AV 10ms AUTO LN ON 60dB

Final Measurement: x QP / + AV  
Meas Time: 1 s  
Subranges: 25  
Acc Margin: 6dB

Transducer No. Start Stop Name  
1 150k 30M NNB4



Liite D2 0,11 mH foliokuristimen johtuvien häiriöiden näennäishuippuarvo- ja keskiarvokäyrät taajuuden funktiona 2. vaihe. Standardin toisen käyttöympäristön raja-arvot ovat merkittyjä punaisella ja violetilla. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]

ABB Industry Oy / Drives  
Mains terminal disturbance

05. Jun 04 13:20

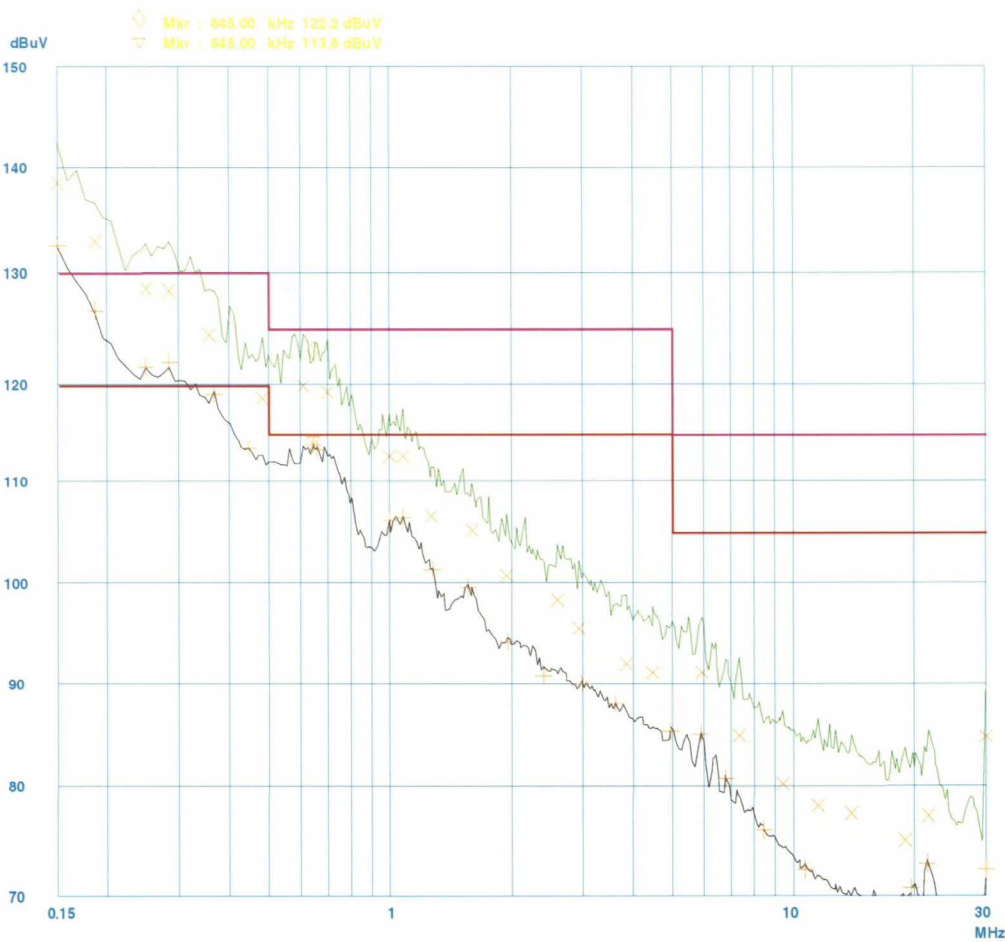
EUT: ACS800-04-0170-5 , 500V supply  
Manuf: ABB Industry Oy  
Op Cond: fouts=17Hz  
Operator: Klaus Jaukkari  
Test Spec: EN55022 / EN50081-2  
Comment: Motor cable: MCMK 3 x 16 mm2 + 16 mm2 (100m)  
Mains cable: 4 x 16 mm2 (2m)

Scan Settings (1 Range)

----- Frequencies -----|----- Receiver Settings -----|  
Start Stop Step IF BW Detector M-Time Atten Preamp OpRge  
150k 30M 9k 10k PK+AV 10ms AUTO LN ON 60dB

Final Measurement: x QP / + AV  
Meas Time: 1 s  
Subranges: 25  
Acc Margin: 6dB

Transducer No. Start Stop Name  
1 150k 30M NNB4



Liite D3 0,11 mH foliokuristimen johtuvien häiriöiden näennäishuippuarvo- ja keskiarvokäyrät taajuuden funktiona 3. vaihe. Standardin toisen käyttöympäristön raja-arvot ovat merkittyjä punaisella ja violetilla. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]

ABB Industry Oy / Drives  
Mains terminal disturbance

05. Jun 04 15:20

EUT: ACS800-04-0170-5 , 500V supply  
Manuf: ABB Industry Oy  
Op Cond: f<sub>out</sub>=17Hz  
Operator: Klaus Jaukkari  
Test Spec: EN5022 / EN50081-2  
Comment: Motor cable: MCMK 3 x 16 mm<sup>2</sup> + 16 mm<sup>2</sup> (100m)

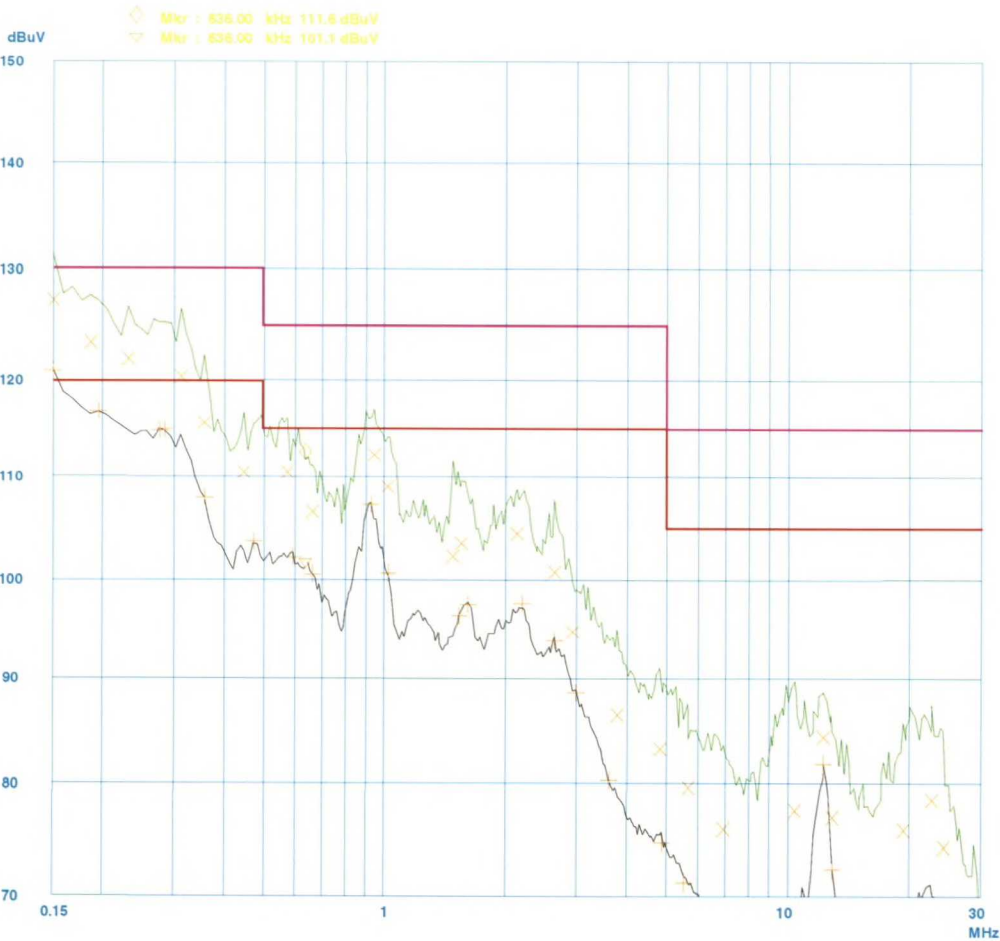
Mains cable: 4 x 16 mm<sup>2</sup> (2m)

Scan Settings (1 Range)

Frequencies				Receiver Settings			
Start	Stop	Step	IF BW	Detector	M-Time	Atten	Preamp OpRge
150k	30M	9k	10k	PK+AV	10ms	AUTO	LN ON 60dB

Final Measurement: x QP / + AV  
Meas Time: 1 s  
Subranges: 25  
Acc Margin: 6dB

Transducer No.	Start	Stop	Name
1	150k	30M	NNB4



Liite D4 0,11 mH lisämaadoituksellisen foliokuristimen johtuvien häiriöiden näennäishuippuarvo- ja keskiarvokäyrät taajuuden funktiona 1. vaihe. Standardin toisen käyttöympäristön raja-arvot ovat merkittyjä punaisella ja violetilla. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]



ABB Industry Oy / Drives  
Mains terminal disturbance

05. Jun 04 15:30

EUT: ACS800-04-0170-5 , 500V supply  
Manuf: ABB Industry Oy  
Op Cond: f<sub>out</sub>=17Hz  
Operator: Klaus Jaukkari  
Test Spec: EN55022 / EN50081-2  
Comment: Motor cable: MCMK 3 x 16 mm<sup>2</sup> + 16 mm<sup>2</sup> (100m)  
Mains cable: 4 x 16 mm<sup>2</sup> (2m)

Scan Settings (1 Range)

----- Frequencies -----|----- Receiver Settings -----|  
Start Stop Step IF BW Detector M-Time Atten Preamp OpRge  
150k 30M 9k 10k PK+AV 10ms AUTO LN ON 60dB

Final Measurement: x QP / + AV  
Meas Time: 1 s  
Subranges: 25  
Acc Margin: 6dB

Transducer No. Start Stop Name  
1 150k 30M NNB4



Liite D5 0,11 mH lisämaadoituksellisen foliokuristimen johtuvien häiriöiden näennäishuippuarvo- ja keskiarvokäyrät taajuuden funktiona 2. vaihe. Standardin toisen käyttöympäristön raja-arvot ovat merkittyjä punaisella ja violetilla. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]

ABB Industry Oy / Drives  
Mains terminal disturbance

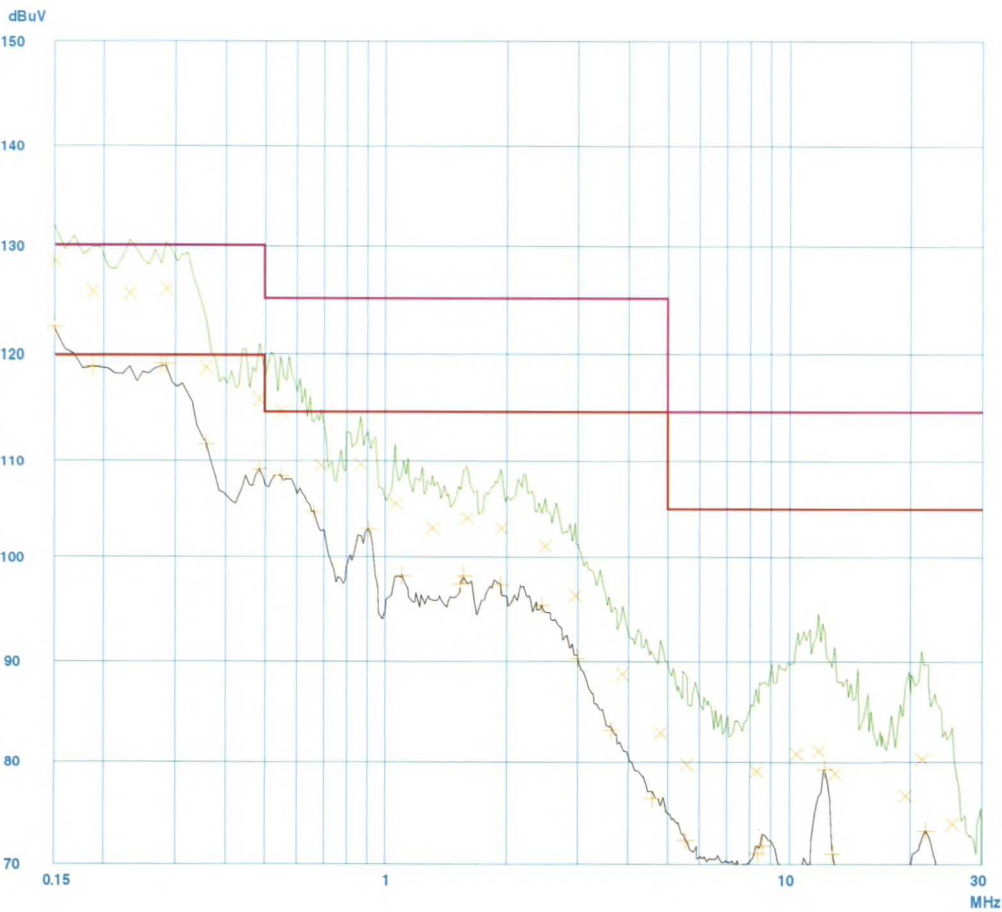
05. Jun 04 15:48

EUT: ACS800-04-0170-5 , 500V supply  
Manuf: ABB Industry Oy  
Op Cond: f<sub>out</sub>=17Hz  
Operator: Klaus Jaukkari  
Test Spec: EN5022 / EN50081-2  
Comment: Motor cable: MCMK 3 x 16 mm<sup>2</sup> + 16 mm<sup>2</sup> (100m)  
Mains cable: 4 x 16 mm<sup>2</sup> (2m)

Scan Settings (1 Range)  
|----- Frequencies -----|----- Receiver Settings -----|  
Start Stop Step IF BW Detector M-Time Atten Preamp OpRge  
150k 30M 9k 10k PK+AV 10ms AUTO LN ON 60dB

Final Measurement: x QP / + AV  
Meas Time: 1 s  
Subranges: 25  
Acc Margin: 6dB

Transducer No.	Start	Stop	Name
1	150k	30M	NNB4



Liite D6 0,11 mH lisämaadoituksellisen foliokuristimen johtuvien häiriöiden näennäishuippuarvo- ja keskiarvokäyrät taajuuden funktiona 3. vaihe. Standardin toisen käyttöympäristön raja-arvot ovat merkittyjä punaisella ja violetilla. [EN 61800-3 1996 ja liite A11 2000]